

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS EN CHILE



Roberto Ipinza Carmona. Ingeniero Forestal de la Universidad de Chile, Dr. Ingeniero de Montes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, España. Más de 20 años de experiencia en INFOR, ex Profesor de Mejoramiento Genético de la Universidad de Chile (1990-1996), ex Director de la Cooperativa de Mejoramiento Genético UACH/CONAF y Empresas Forestales (1993- 1996), Consultor Internacional en Mejoramiento Genético Forestal. Posteriormente, Director Ejecutivo del Instituto Forestal (2001 – 2006) y miembro del *Executive Board* de IUFRO (2005 - 2010). Especialista en Estrategias de Conservación y Mejora de Recursos Genéticos, y en Gestión de Recursos Naturales, incluyendo medidas de mitigación y compensación ante el cambio climático. Actualmente Coordinador del grupo de Conservación y Mejoramiento Genético. Sus publicaciones se encuentran disponibles en:



Instituto Forestal. Chile.
robertoipinza@infor.cl

Santiago Barros Asenjo. Ingeniero Forestal de la Universidad de Chile (1975), DGS de la Universidad Adolfo Ibáñez (1996). Más de 30 años de experiencia en INFOR como investigador, Jefe de Proyectos y Jefe de la División Silvicultura. Preside el Comité Editor de INFOR y es editor de la Revista Ciencia e Investigación Forestal de la Institución. Se ha especializado en selección de especies, silvicultura de plantaciones forestales y desarrollo de zonas áridas y semiáridas. Fue profesor de cátedra de Silvicultura de Plantaciones de la Universidad Mayor. En el ámbito internacional ha sido consultor de IDRC de Canadá, FAO y GTZ de Alemania, es miembro del *International Council* de IUFRO en representación de Chile y Coordinador de los Grupos de Trabajo Desarrollo Forestal de Zonas Áridas y Semiárida y Red de Información Forestal para América Latina y El Caribe de esta organización internacional. Es autor, coautor o editor de más de 70 publicaciones, entre las que destacan varios libros y manuales.

Instituto Forestal. Chile.
sbarros@infor.cl

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS EN CHILE

Editores

Roberto Ipinza C.
Santiago Barros A.
Braulio Gutiérrez C.
Nuno Borralho

**Instituto Forestal
2014**





INFOR

Instituto Forestal
Sucre 2397, Ñuñoa, Santiago
Chile
Tel. 56 2 3667115
ISBN N° 978-956-318-091-6

www.infor.cl



CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA	7
RECONOCIMIENTOS	8
INTRODUCCIÓN. Santiago Barros A.	11
I.- POBLACIONES BASE DE EUCALIPTOS	15
Capítulo 1. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS: HISTORIA, AVANCES Y TENDENCIAS. Roberto Ipinza C., Braulio Gutiérrez C. y Maria Paz Molina B.	17
Capítulo 2. LOS EUCALIPTOS EN EL MUNDO. Santiago Barros A.	35
Capítulo 3. LOS EUCALIPTOS EN CHILE. Santiago Barros A.	63
Capítulo 4. EL RECURSO PLANTACIONES DE EUCALIPTOS EN CHILE Y SUS PROYECCIONES. Jorge Cabrera P., Santiago Barros A., Marjorie Martin S., Alberto Ávila C. y Gonzalo Paredes.	87
Capítulo 5. ASPECTOS FITOSANITARIOS EN EUCALIPTOS. Osvaldo Ramírez G.	103
Capítulo 6. PLATAFORMA GRIN-GLOBAL PARA EL MANEJO DE RECURSOS GENÉTICOS EN EL INSTITUTO FORESTAL. Roberto Ipinza C., Maria Paz Molina B., Cristián Rojas, Braulio Gutiérrez y Oriana Ortiz.	119
II.- BIOTECNOLOGÍA Y PROPAGACIÓN DE EUCALIPTOS	133
Capítulo 7. LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE EUCALIPTOS EN CHILE. Teotônio Francisco de Assis y Francisco Rodríguez.	135
Capítulo 8. PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE <i>Eucalyptus globulus</i> . Francisco Soria y Gustavo López.	147
Capítulo 9. MICROPROPAGACIÓN DE <i>Eucalyptus globulus</i> . Oriana Ortiz N.	167
Capítulo 10. BIOLOGÍA REPRODUCTIVA E HIBRIDACIÓN DE <i>Eucalyptus globulus</i> . Patricio Rojas V.	201
Capítulo 11. MANEJO DE HUERTO SEMILLERO CLONAL DE <i>Eucalyptus nitens</i> CON BAJAS TENSIONES DE CRECIMIENTO. RUCAMANQUI. Maria Paz Molina B., Roberto Ipinza C., Verónica Emhart y Oriana Ortiz N.	211

Capítulo 12. TRANSGÉNICOS EN LOS SECTORES AGRÍCOLA Y FORESTAL. AVANCES, BENEFICIOS Y DESAFÍOS. Miguel Ángel Sánchez.	227
III.- SELECCIÓN Y MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS PARA CONDICIONES ADVERSAS	247
Capítulo 13. ANTECEDENTES DE DESARROLLO Y POTENCIAL PRODUCTIVO DE VARIEDADES HÍBRIDAS ENTRE <i>Eucalyptus nitens</i> y <i>Eucalyptus globulus</i> EN CHILE. LA EXPERIENCIA CMPC. Alex Medina, Verónica Emhart, Ricardo Navarrete, Berta Rothen, Marcela Labra y Edgardo Velilla.	249
Capítulo 14. SELECCIÓN CLONAL Y OTRAS ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LA TOLERANCIA AL FRÍO DE <i>Eucalyptus globulus</i> . Braulio Gutiérrez C.	263
Capítulo 15. SELECCIÓN INTRAESPECÍFICA PARA MEJORAR LA TOLERANCIA A LA SEQUÍA DE <i>Eucalyptus globulus</i> EN EL SECANO DE LA REGIÓN DEL BIO-BIO. Patricio Rojas V., María Paz Molina B., Roberto Ipinza C. y Andrés Bello D.	279
Capítulo 16. EVALUACIÓN DE SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO INICIAL DE ESPECIES MENORES DE <i>Eucalyptus</i> Y <i>Corymbia</i> BAJO CONDICIONES DE ARIDEZ. Braulio Gutiérrez C., María Paz Molina B. y Santiago Barros A.	313
IV.- SELECCIÓN Y MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS ORIENTADO A PRODUCTOS	325
Capítulo 17. DESARROLLO Y PERSPECTIVA DEL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS PARA PRODUCCIÓN DE PULPA. Nuno Borralho.	327
Capítulo 18. PROTOTIPO VISUAL DE <i>Eucalyptus nitens</i> IDÓNEO PARA USO INDUSTRIAL. Roberto Ipinza C., Patricio Salazar, Braulio Gutiérrez C. y Carlos Buchner A.	353
Capítulo 19. IDENTIFICACIÓN DE LAS LIMITANTES DE <i>Eucalyptus nitens</i> PARA MADERA SÓLIDA. Carlos Büchner A., Jorge Cabrera P. y Roberto Ipinza C.	363
Capítulo 20. BASES CONCEPTUALES PARA ESTABLECER UN PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DE <i>Eucalyptus nitens</i> PARA USO SÓLIDO. Roberto Ipinza C., María Paz Molina B., Braulio Gutiérrez C. y Oriana Ortiz N.	377
Capítulo 21. ESTRATEGIA DE MEJORAMIENTO DE <i>Eucalyptus nitens</i> PARA MADERA DE CALIDAD. Roberto Ipinza C., Verónica Emhart, Braulio Gutiérrez C., María Paz Molina B., Oriana Ortiz N, Patricio Rojas V., Laura Koch, Alex Medina, Edgardo Velilla y Nuno Borralho.	393

V.- OTROS PROGRAMAS DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS EN EL MUNDO	409
Capítulo 22. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS DE ZONAS TEMPLADAS EN AUSTRALIA. B. M. Potts, M. Hamilton y D. J. Pilbeam.	411
Capítulo 23. MEJORAMIENTO GENÉTICO Y SILVICULTURA DE EUCALIPTOS EN LA REGIÓN ANDINA DE COLOMBIA. Víctor M. Nieto R., Byron Urrego, Rubén Darío Castaño, Raúl Jaime Hernández, Nélida Faride Torres R. y Ximena Laverde B.	445
Capítulo 24. MEJORAMIENTO GENÉTICO Y SILVICULTURA DE EUCALIPTOS EN LAS REGIONES DE LOS LLANOS ORIENTALES Y LA COSTA ATLÁNTICA DE COLOMBIA. Víctor M. Nieto R., Hilario Bermúdez G. y Ximena Laverde B.	461
Capítulo 25. PROGRAMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE <i>Eucalyptus nitens</i> DE SPT - SEED PRODUCTION TECHNOLOGIES – CHILE. Rebeca Sanhueza.	477



DEDICATORIA

Este libro está dedicado a la memoria del Dr. Gonzalo Paredes Veloso, quien nos dejó el 8 de Octubre de 2012, en Valdivia, Chile. Gonzalo fue un Ingeniero Forestal formado en la Universidad Austral de Chile y doctorado en Economía Forestal en la Universidad del Estado de Oregón en EEUU. Fue Decano de la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales de la Universidad Austral de Chile en Valdivia, durante dos períodos de su carrera.

Entre los años 1997 y 2000 fue Director Ejecutivo del Instituto Forestal, principal organismo de investigación forestal aplicada del Estado chileno.

Líder importante en el desarrollo de la investigación forestal de Chile, en especial en colaboraciones en el marco público - privado, donde destacó en la dirección del Simulador Radiata y en estudios de proyecciones de la disponibilidad de madera de pino y eucalipto, liderados por el Instituto Forestal, que han tenido un impacto relevante en la inversión forestal en Chile.

Gonzalo era un firme partidario de las plantaciones forestales, en especial aquellas de eucalipto, y siempre destacó el sentido de equidad social que implicaba su establecimiento. La familia, los amigos, la docencia, la investigación, la madera y los libros siempre estuvieron acompañándolo....

“El conocimiento de nada sirve si no se comparte.” (A. Einstein)

RECONOCIMIENTOS

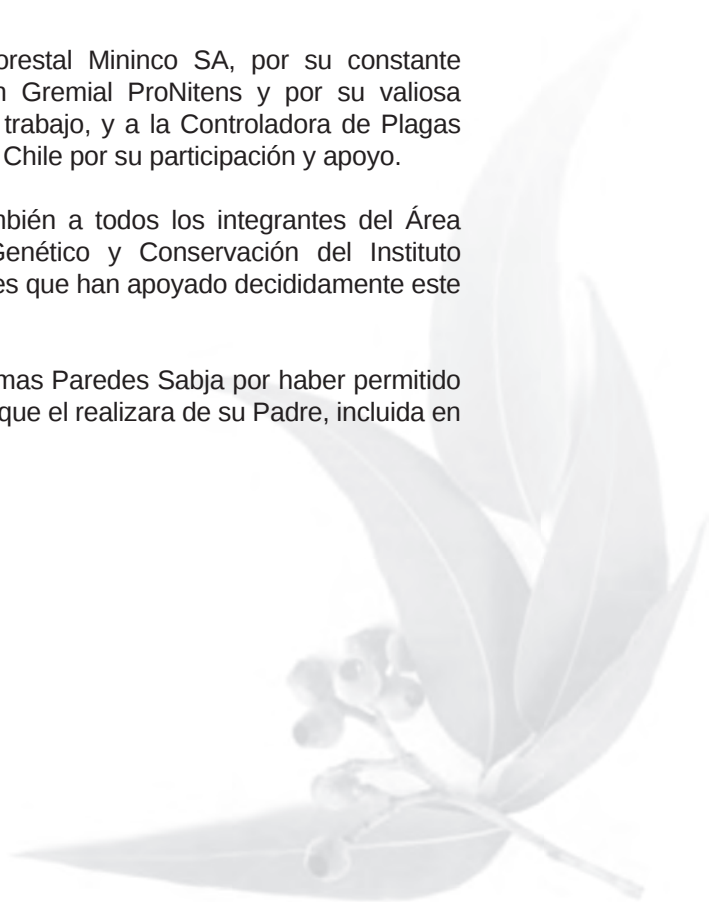
En primer lugar los editores desean expresar su agradecimiento a Fernando Bas Mir, Director Ejecutivo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA), por haber confiado en el Instituto Forestal para la realización del presente libro.

De igual forma reconocen el valioso apoyo científico que han brindado especialistas argentinos, australianos, brasileños, colombianos, chilenos, españoles y portugueses, que han contribuido desinteresadamente con diferentes capítulos sobre el Mejoramiento Genético Forestal de los Eucaliptos.

Menciones especiales a Forestal Mininco SA, por su constante y decidido apoyo a la Asociación Gremial ProNitens y por su valiosa colaboración al desarrollo de este trabajo, y a la Controladora de Plagas SA, a ChileBio y a la empresa STP Chile por su participación y apoyo.

Los editores agradecen también a todos los integrantes del Área de Investigación Mejoramiento Genético y Conservación del Instituto Forestal, así como a sus autoridades que han apoyado decididamente este emprendimiento.

Finalmente, agradecen a Tomas Paredes Sabja por haber permitido utilizar la grabación sobre madera, que el realizara de su Padre, incluida en la dedicatoria del libro.





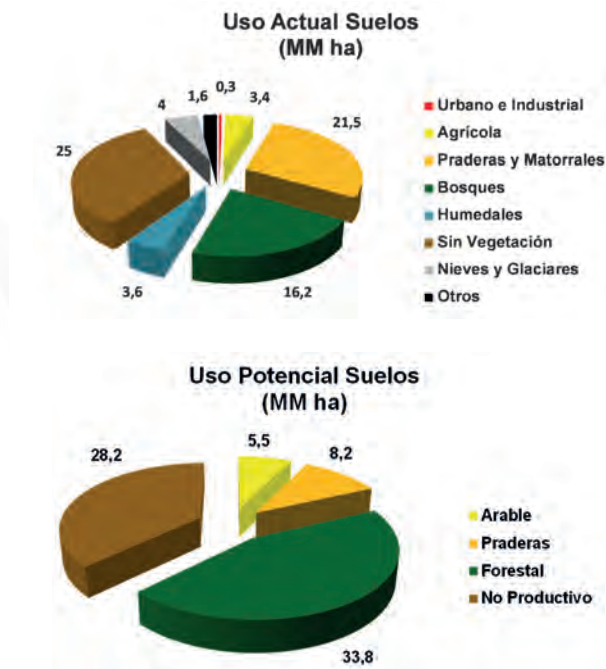
EUCALIPTOS MEJORADOS PARA AUMENTAR LA COMPETITIVIDAD DEL SECTOR FORESTAL EN AMÉRICA LATINA
CONGRESO LATINOAMERICANO
Pucon, CHILE, 22 – 23 Noviembre , 2012
Países presentes: Argentina, Australia, Brasil, Chile, Colombia, España, Nueva Zelanda, Perú, Portugal, Sudáfrica y Uruguay.

INTRODUCCIÓN

Santiago Barros A.¹

Chile se extiende desde los 18° a los 55° LS ocupando un territorio de más de 4 mil kilómetros de largo entre la Cordillera de Los Andes y el Océano Pacífico. Su superficie continental es de 75,8 millones de hectáreas y su población se estima para 2013 en 17,6 millones de habitantes².

Dada su posición geográfica el país se caracteriza por una gran diversidad climática, que se manifiesta en ambientes como desierto absoluto y zonas áridas y semiáridas en la parte norte y central y bosques templados y templados fríos en la zona sur y austral.



La gran diversidad climática del país se refleja en el uso de los suelos. Destaca que aproximadamente un tercera parte de la superficie nacional continental la constituyen suelos no productivos, por razones climáticas fundamentalmente, y otra tercera parte está representada por suelos forestales.

¹ Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Instituto Forestal. Chile. sbarros@infor.cl

² INE, 2013. Productos Estadísticos. Estadísticas Demográficas y Vitales. Proyección de Población. Instituto Nacional de Estadísticas. Chile. En: http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/familias/demograficas_vitales.php

La cubierta forestal del país al año 2011 es cercana a los 16 millones de hectáreas y corresponde a 13,3 millones de hectáreas de bosques nativos y 2,4 millones de hectáreas de plantaciones forestales³. Una comparación entre el uso actual⁴ y el uso potencial⁴ de los suelos sugiere que antes del descubrimiento de Chile y llegada de los españoles, hace casi 500 años, la superficie de bosques nativos era al menos el doble de la actual y que extensas superficies de suelos han cambiado de uso, de bosques a lo que hoy son las áreas de uso agrícola y las de praderas y matorrales.

Desde las épocas de la Conquista y la Colonia, a medida que el poblamiento del territorio aumentó, grandes extensiones de terrenos fueron quemadas y deforestadas para habilitar suelos para agricultura y ganadería, y la minería por su parte requería de importantes volúmenes de madera para combustible y para el revestimiento de sus socavones y galerías.

Desde la Independencia (1810), con el permanente incremento de la población, la pérdida de bosques se mantuvo debido a grandes incendios forestales y a la explotación descontrolada de estos, y los bosques remanentes en tanto eran sometidos a continuas prácticas de extracción selectiva (floreo) en las que se cortaban los mejores árboles y de las especies más valiosas, situación que condujo a que gran parte de los bosques nativos actuales se encuentran fraccionados, degradados y empobrecidos en su composición de especies.

Solo desde mediados del siglo pasado se empiezan a detener los procesos de deforestación; desde los años 50 las plantaciones forestales comienzan a extenderse, reduciendo crecientemente la presión sobre los bosques nativos; se implementa un Sistema de Áreas Protegidas por el Estado, en el cual se ponen bajo régimen de conservación más de 16 millones de hectáreas, en donde están representados los principales ecosistemas del país, incluidos 4 millones de hectáreas de bosques nativos; desde los años 70 el Estado fomenta la creación de plantaciones, regula toda intervención sobre los bosques, hace obligatoria la reforestación e inicia fuertes programas de prevención y control de incendios forestales; y más recientemente se promulga una legislación para el fomento a la recuperación y manejo de los bosques nativos.

Hoy en Chile la deforestación es prácticamente inexistente, por el contrario, la recuperación natural de diversas áreas de bosques nativos y la masificación de las plantaciones forestales están incrementando paulatinamente la cubierta forestal del país. Las intervenciones sobre los bosques están reguladas por el Estado. Existe una política de fomento a las plantaciones que ha sido estable por ya casi 40 años y que ha sido decisiva en la creación de un valioso recurso forestal y en el desarrollo de una fuerte industria basada en él. Las plantaciones forestales están produciendo la casi totalidad de la madera para fines industriales, tanto para el consumo doméstico como para los mercados de exportación, generando importantes retornos de divisas y fuentes de trabajo. La presión sobre los bosques nativos es ahora comparativamente mínima y se dispone ya de una normativa de fomento para su recuperación y manejo.

Sin embargo, como herencia de las malas prácticas del pasado, existen grandes extensiones de terrenos desarbolados y bajo procesos de erosión que deben ser forestados,

3 INFOR, 2012. Anuario Forestal 2012. Boletín Estadístico N° 136. Instituto Forestal. Chile.

4 INFOR, 1993. Estadísticas Forestales. Boletín Estadístico N° 30. Instituto Forestal. Chile

estimándose que la superficie de plantaciones del país podría ser duplicada en el mediano plazo y tal vez triplicada o más en el largo plazo. Los bosques nativos se encuentran fragmentados, degradados y empobrecidos en su riqueza de especies valiosas, pero una importante parte de ellos son considerados comerciales y deben ser incorporados a la producción forestal bajo manejo forestal sostenible. Estos son los grandes desafíos actuales del sector forestal chileno y para enfrentarlos en forma exitosa es imprescindible que tanto el Estado como el sector privado mantengan el esfuerzo realizado durante las últimas décadas, que ha transformado a Chile en un país con un desarrollo forestal ampliamente reconocido internacionalmente.

Las plantaciones forestales en el país están constituidas por especies exóticas de rápido crecimiento, fundamentalmente *Pinus radiata*, especie originaria de California en Norteamérica que fue introducida al país en los últimos años del siglo XIX y cuyo uso en plantaciones se masificó desde mediados de siglo XX, existiendo hoy unos 1,5 millones de hectáreas plantadas. La segunda especie en las plantaciones forestales del país es *Eucalyptus globulus*, originaria del sur de Australia e introducida al país también a fines del siglo XIX, cuyo uso en plantaciones fue secundario, principalmente para la producción de leñas y postes, hasta que a partir de los años 80 del siglo pasado se incrementa su empleo en plantaciones y estas alcanza en la actualidad a más de 500 mil hectáreas. La tercera especie en las plantaciones es *Eucalyptus nitens*, también originaria del sur de Australia e introducida al país en los años 60 del siglo pasado por el Instituto Forestal, su participación en las plantaciones aumentó desde los años 80 y hoy existen más de 200 mil hectáreas plantadas. Todas estas plantaciones se encuentran muy mayoritariamente en la zona centro sur del país y existen, además, cerca de 200 mil hectáreas de otras especies, principalmente de los géneros *Acacia*, *Atriplex*, *Eucalyptus*, *Populus*, *Pinus*, *Prosopis*, *Pseudotsuga* y otros, en diferentes regiones del país.

El actual desarrollo del recurso plantaciones forestales y muy en especial de aquellas de eucaliptos, se debe en gran medida a diferentes líneas de investigación desarrolladas desde los años 60 del siglo pasado por el Instituto Forestal (INFOR), organismo de investigación forestal del Estado, hoy adscrito al Ministerio de Agricultura.

INFOR desde sus inicios en 1961, como proyecto del Gobierno de Chile y las Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y posteriormente como Instituto Tecnológico de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), desarrolló un intenso y sistemático Programa de Introducción de Especies Forestales al país, orientado a la selección de especies para la repoblación de las grandes áreas de suelos disponibles para la forestación, el cual en el caso de los eucaliptos se tradujo en la introducción y selección de especies como *Eucalyptus nitens*, hoy ya de masivo uso en las plantaciones, y como *Eucalyptus delegatensis*, *E. camaldulensis*, *E. cladocalyx*, *E. sideroxylon*, *E. regnans*, *E. viminalis* y otras, cuyo uso en plantaciones ya es incipiente en diferentes regiones de Chile, además aquellas del denominado complejo *Eucalyptus globulus* (*E. globulus ssp globulus*, *E. globulus ssp bicostata* y *E. globulus ssp maidenii*).

Este programa de investigaciones fue seguido por líneas de trabajo en torno a la silvicultura de las principales especies y se abordaron investigaciones sobre viverización de plantas, establecimiento de plantaciones y otras, que condujeron a la adopción en el país de un tecnificado manejo de semillas y la producción de plantas en contenedores, y de las técnicas intensivas de establecimiento de plantaciones, que incorporan una fuerte preparación de suelos, eliminación de la competencia de malezas y en muchos casos fertilización inicial,

desarrollos que hoy son de aplicación masiva y que han mejorado sustancialmente la calidad y uniformidad de las plantas en uso y los niveles de supervivencia y desarrollo inicial de las plantaciones, incluso haciéndolas posibles en sitios donde antes no lo era.

Más recientemente, desde mediados de los años 80 del siglo pasado, INFOR inicia las investigaciones en el ámbito del mejoramiento genético, intensificando la selección de procedencias de semillas e iniciando las investigaciones que incorporan también la selección a nivel de progenies, para dar paso finalmente a los programas de mejoramiento genético que hoy desarrollan INFOR y las principales empresas forestales, que ya no solo buscan mayores crecimientos y rendimientos volumétricos en distintos sitios, sino que mejoras más específicas, en términos de respuesta a sitios con limitaciones especiales, como escasas disponibilidades hídricas o frío, y en términos de los productos a obtener de las plantaciones, buscándose en este caso una mayor aptitud pulpable de la madera o resolver limitantes tecnológicas para la elaboración de productos de mayor valor, como madera aserrada, tableros y chapas.





INFOR

I. POBLACIONES BASE DE EUCALIPTOS

1. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS HISTORIA, AVANCES Y TENDENCIAS

Roberto Ipinza C.¹
Braulio Gutiérrez C.²
Maria Paz Molina B.³

INTRODUCCIÓN

Hoy existen evidencias inequívocas de la presencia de un macrofósil del género *Eucalyptus* en la laguna del Hunco, en el noreste de la provincia de Chubut, en el sur del Argentina (Gandolfo *et al.*, 2011). Su presencia data de inicio del Eoceno (hace 52 millones de años). Esto sugiere que la presencia del género *Eucalyptus*, como la especie plantada más importante en América del Sur, parece no ser ya una casualidad, su variación genética y su biodiversidad hoy están de vuelta.

La rápida expansión de esta especie en el mundo hoy es incuestionable debido a su rápido retorno de la inversión. La notable capacidad del género para responder al mejoramiento genético, que es la disciplina encargada de la aplicación de los principios de la genética forestal, ha sido intensivamente documentada (Eldridge, *et al.*, 1994). No obstante el mejoramiento genético por sí solo no basta, este debe estar inmerso en una política de investigación de corto y largo plazo, y con una masa de investigadores en permanente formación y del más alto nivel (Namkoong *et al.*, 1988).

En Chile, en el año 1998, un grupo de investigadores de la Universidad Austral de Chile, el Instituto Forestal y la Corporación Nacional Forestal, junto a especialistas de renombre mundial como el Dr. Nuno Borralho de Portugal decidieron realizar el primer curso internacional de Mejora Genética Forestal Operativa (Ipinza, 1998), con el objeto de expandir el conocimiento de esta tecnología a nivel de América del Sur. Nunca se imaginó las repercusiones y entusiasmo que este curso abierto a la comunidad traería durante los años siguientes, en especial en Chile, Brasil, Colombia y Argentina, entre otros. En Chile fue un periodo en que muchos investigadores jóvenes iniciaron sus respectivas especializaciones y hoy con sus postgrados son profesores de Mejoramiento Genético Forestal en muchas Universidades extranjeras y chilenas, y otros manejan innovadores programas en empresas privadas. En la mayoría de ellos hay que reconocer el papel de formador de mejoradores genéticos forestales que ha tenido el Dr. Timothy White de la Universidad de Florida (EEUU).

A nivel mundial, en la década del 20, se realizaron en silvicultura los primeros esfuerzos tendientes a la selección y mejoramiento de genotipos superiores. El mejoramiento genético, en la forma general como se lo conoce en la actualidad, solo se inició en la década del 50 (Namkoong, *et al.*, 1988), con los trabajos de Syrach Larsen (1956). Actualmente el mejoramiento genético constituye una parte operacional de todos los programas de manejo forestal intensivo en el mundo y es una extensión, con algunos ajustes, de las técnicas de

1 Ingeniero Forestal, Dr. Ingeniero de Montes. Instituto Forestal. roberto.ipinza@infor.cl

2 Ingeniero Forestal. Instituto Forestal. bgutierr@infor.cl

3 Ingeniero Forestal, MSc. Instituto Forestal. mmolina@infor.cl

mejora genética de los cultivos agrícolas y más recientemente de la genética animal. El sistema de plantaciones en el sentido de White *et al.* (2007) es donde se ha realizado el mayor esfuerzo formal del mejoramiento genético, obteniéndose un gran valor de producción.

Chile no ha estado ajeno a este desarrollo, al respecto hay que reconocer la visión estratégica del Instituto Forestal (INFOR) al iniciar en 1962 los programas de introducción de especies. Este Instituto estuvo involucrado en los inicios en los programas de mejoramiento genéticos de dos especies muy importante para Chile, en términos operacionales ello implicó la creación de un huerto de pino (*Pinus radiata* D. Don.), establecido en 1972 y para la especie endémica quillay (*Quillaja saponaria* Mol.), se estableció (1972-1974) un ensayo de procedencia que acopiaba toda la distribución natural de la especie (Rene Alfaro, Comunicación Personal, 2013), ambas unidades de mejoramiento genético se plantaron en la Reina (Santiago de Chile). Antes de eso, el Dr. Fernando Garrido, ex miembro del directorio de INFOR, ex profesor de la Universidad de Chile, y padre del mejoramiento genético forestal en Chile, había establecido, en 1967, un huerto semillero clonal de pino radiata para INFORSA, en la zona de Nacimiento; y en 1968 un huerto semillero de semillas, de la misma especie para Forestal Arauco, en Santa Rosa de Lebu (Región del Biobío). En 1978, usando el modelo Universidad Empresa de la Universidad de Carolina del Norte (EE.UU), la Universidad Austral de Chile establece la Cooperativa de Mejoramiento Genético, la cual ha tenido un papel relevante dentro de las empresas y su función principal e histórica ha sido la mantención de las poblaciones bases de las especies exóticas de rápido crecimiento.

Para que la industria forestal del siglo XXI pueda sobrevivir ante los escenarios de cambio climático, el mejoramiento genético deberá continuar desempeñando su importante rol, de modo que los nuevos avances en genómica y biotecnología no harán más que complementar las actividades de selección y de mejora genética futura.

DESDE LOS SIMPLE A LO COMPLEJO

La domesticación y mejora genética implica simplemente una secuencia repetida de selección y cruzamiento que persigue, a través de un cambio en la frecuencia de génica, aumentar la proporción de individuos deseables en las sucesivas generaciones de plantaciones comerciales (Ipinza, 2000). Lamentablemente, cuando se inicia un programa no se dispone de mucha información sobre las frecuencias genéticas que controlan los rasgos o características que se desea modificar para luego aplicar la teoría estadística de la selección genética. Ante esta falta de información, el mejorador en los inicios de los programas de mejora tuvo que utilizar el fragmentado conocimiento de la biología reproductiva, la moderna teoría genética, sentido común y algo de paciencia. Afortunadamente una expresión matemática ha venido en ayuda del mejorador genético forestal, conocida como la ecuación del mejorador (*the breeder's equation*) y que tiene la siguiente forma:

$$R = h^2 S.$$

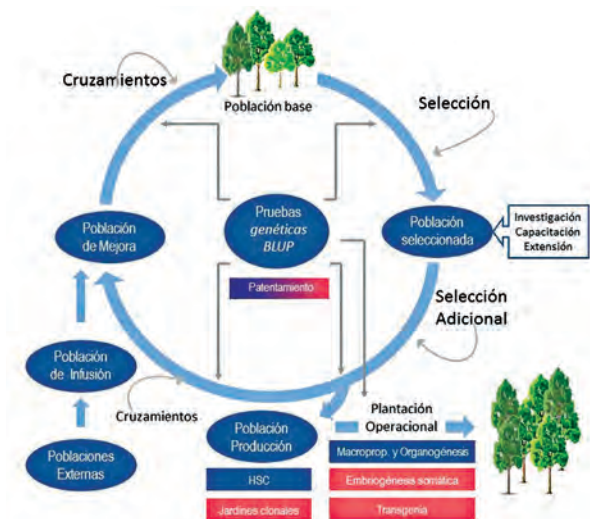
Donde: R: Es la respuesta a la selección, definida como la diferencia en la media fenotípica de la generación progenitora antes y después de la selección.

h^2 : Es la heredabilidad (en sentido restringido), que se define como el cociente entre la varianza genética aditiva de una característica o rasgo y la varianza fenotípica total de este mismo rasgo.

S: Es el diferencial de selección, definido como la diferencia entre la media fenotípica de la generación progenitora antes y después de la selección.

Esta ecuación, cuyos orígenes son algo desconocidos, ha sido fundamental en el enfoque pragmático del mejoramiento genético de los *Eucalyptus* y otras especies forestales.

Otros de los elementos más didácticos que expresan el ciclo de mejoramiento genético lo ha expuesto White *et al.* (2007) y ha sido el esquema general que, con algunos matices, han seguido todos los programas de mejoramiento genético a nivel mundial, y donde el género *Eucalyptus* no ha sido una excepción (Figura N° 1).



(Fuente: Modificado de White *et al.*, 2007)

Figura N° 1.
CICLO DE MEJORA GENÉTICA. DONDE BLUP⁴ ES UN MÉTODO PARA PREDECIR EL VALOR DE MEJORA, O VALOR GENÉTICO DE CADA ÁRBOL O FAMILIA.

El esquema de White *et al.* (2007) considera una población base, una población seleccionada, una población de producción (fuera del ciclo), una población de mejoramiento o mejora, y una población de infusión. El corazón del programa lo constituyen los ensayos genéticos que gobiernan el programa de mejora genética. En este esquema es importante recordar que una misma población física puede tener varias funciones en el ciclo de mejora.

Pese a que el modelo conceptual no ha cambiado, hoy la situación se ha complejizado y seguramente en el futuro lo seguirá haciendo, pero por otra parte gracias a la accesibilidad de la tecnología de los marcadores moleculares, es posible acercarse más al ADN de los árboles forestales de interés económico. En la Figura N° 2, se ilustra un sencillo ejemplo de integración de la información molecular en un programa de hibridación (Fonseca *et al.*, 2010).

⁴ Best Linear Unbiased Predictor

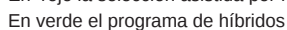




Figura N° 3
PIRÁMIDE DE BURDON
INTEGRACIÓN ENTRE LA CONSERVACIÓN Y EL MEJORAMIENTO GENÉTICO

En la Figura N° 3, en la parte inferior de la pirámide se puede distinguir una extensa base denominada población base de recursos genéticos forestales (RGF), que corresponde a los ensayos de progenie y procedencia de *Eucalyptus spp*, que exhibe una amplia diversidad genética y que normalmente es colectada de las poblaciones de conservación *in situ*, en Australia preferentemente. Luego se observa una población de mejora o mejoramiento que se obtiene mediante muestreo de la anterior y que es de naturaleza *ex situ* y, finalmente, poblaciones elites en la cúspide de la pirámide, que son las encargadas de producir el germoplasma necesario para alcanzar importantes niveles de ganancias genéticas, pero a costa de reducir la diversidad genética de la especie.

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS, HISTORIA Y ESTADO ACTUAL

Un análisis intensivo sobre la domesticación y mejoramiento de los eucaliptos es realizado por Eldridge *et al.* (1994), donde al analizar la importancia de los eucaliptos en el mundo toca aspectos históricos del uso de las poblaciones bases, procedencias y variación intraespecífica, huertos semilleros, propagación vegetativa y micro propagación. De acuerdo a los antecedentes aportados por Raymond y Apiolaza (2004), Griffin (2008) y Tibbits *et al.* (1997), se puede establecer que, si bien la domesticación de especies de *Eucalyptus* se inició hace cerca de 150 años, fue en la década de los 70 y 80 del siglo XX cuando comienza a despegar el mejoramiento formal para caracteres de importancia económica. Los primeros programas en *E. globulus* se iniciaron a finales de la década de los 60 en Portugal y Australia, mientras que en otros países que ahora cultivan esta especie (Chile, Argentina, España, Portugal, Sudáfrica, Nueva Zelanda, entre otros) estos programas comenzaron entre fines de los 80 y principios de los 90. En el caso de *E. nitens* los primeros programas de mejora se iniciaron a mediados de los 70 en Australia, aunque la mayoría de los programas de los demás países comenzaron recién a inicios de los 90.

Inicialmente las plantaciones se establecían con semilla de poblaciones silvestres, que numerosos forestales sudamericanos y de otras regiones del globo colectaban en Australia, o adquirían a diversos centros semilleros australianos, principalmente al Australian Tree Seed

Centre de CSIRO⁵. Como consecuencia, se hizo evidente la gran variabilidad intraespecífica en los caracteres de interés y se dio cabida a los primeros trabajos de mejoramiento, los que se concentraron en establecer en distintos ambientes (sitios) ensayos de especies y de progenie y procedencias que llevan la expresión del genotipo, para determinar la idoneidad de diversos materiales genéticos en condiciones locales de producción y sus interacciones con el medioambiente, donde el clima, el suelo la densidad de plantación, los agentes bióticos (plagas y enfermedades forestales), los tratamientos silviculturales, la altitud y la exposición modifican y afectan la expresión de fenotipo, que es lo que finalmente se puede observar y medir. Como resultado, el fenotipo (genotipo + medioambiente) (Falconer y McKay, 1996) y la variabilidad intraespecífica de las especies de interés pudieron ser establecidos y analizados, de modo que cada país los ha usado como base para el mejoramiento en condiciones locales y según los objetivos de su interés.

Los ensayos de introducción de especies permitieron seleccionar los materiales más promisorios, se efectuó extensas colectas de semillas de familias individuales dentro de procedencias específicas y se estableció completos ensayos de progenies y procedencia en diversas condiciones de sitio. Estos ensayos constituyeron las poblaciones base de mejora para cada especie y permitieron la obtención de parámetros genéticos para diversos rasgos de interés que ayudaron a la toma de decisiones relacionadas con el progreso de los programas de mejora. En muchos casos la población base y la población de mejoramiento es la misma población física, pero con distintas funciones.

A medida que avanzaban los programas de mejoramiento, el número de caracteres evaluados se incrementó. Si bien en un comienzo el interés se centró en la supervivencia y crecimiento inicial, por estar directamente relacionados con el éxito de las plantaciones, a medida que los árboles crecían se hizo interesante incorporar otros caracteres además del volumen, entre ellos los relacionados con la forma, como la rectitud del fuste y algunos atributos de la copa y las ramas. Posteriormente los programas de selección han dado interés a caracteres relacionados con la tolerancia a condiciones adversas, como frío, sequía, enfermedades, plagas u otros, los cuales se relacionan con la capacidad de los individuos para sobrevivir bajo determinadas condiciones que deben enfrentar en sus áreas de plantación.

La formalización de objetivos de mejora surgió de la necesidad de alinear los programas de mejoramiento con los objetivos económicos de las empresas, situación que se tradujo en un mayor énfasis en las propiedades de la madera, tal como la densidad específica, y en las formas de muestrearlas y evaluarlas. Sin embargo, hasta los años 90 los trabajos sobre evaluación de caracteres relacionados con propiedades de la madera en los programas de mejoramiento de eucaliptos eran escasos, debido a varias razones; estos programas requieren analizar un gran número de árboles individuales y de familias, y los métodos tradicionales de análisis de propiedades de la madera son caros y usualmente destructivos, lo que limita el número de muestras que pueden ser procesadas. Adicionalmente, para especies como *E. globulus* y *E. nitens* que no se propagan fácilmente en forma vegetativa, el muestreo destructivo involucra la pérdida de genotipos valiosos para el programa de mejoramiento. En este particular, en las últimas décadas las principales áreas de investigación para la selección de eucaliptos con miras a mejorar las propiedades de su madera han sido: Desarrollar métodos de muestreo no destructivos, en este sentido surge la tecnología NIR

5 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation.

(Near Infrared Spectroscopy), fundamentalmente para la densidad de la madera, rendimiento pulpa, módulo de elasticidad y ángulo microfibrilar, entre otros; evaluar métodos o criterios de selección sobre variables alternativas que sirvan como estimadores de otros caracteres más difíciles o caros de determinar; y evaluar el grado y estructura de la variación genética de los caracteres relacionados con calidad de la madera. En este sentido, la técnica NIR se ha convertido en un estándar especialmente para los eucaliptos (Raymond, 2002; Mora, 2009).

Otros caracteres que han sido importantes en los programas de mejoramiento genético de eucaliptos y que están directamente relacionados con el éxito de los mismos, son aquellos que se relacionan con la capacidad de expandir en las plantaciones operacionales las ganancias genéticas obtenidas en las poblaciones de mejora. Un carácter típico de este tipo es la capacidad de enraizamiento.

Tradicionalmente, las poblaciones de producción de los programas de mejoramiento genético de eucalipto han sido huertos semilleros que producen semilla de polinización abierta. A medida que la tecnología de la polinización y de la propagación vegetativa avanza, se hacen más atractivas desde el punto de vista económico otras alternativas de poblaciones de producción, tales como plantas de hermanos completos, híbridos, estacas enraizadas y cultivo de tejidos.

Para una comprensión detallada del progreso de la genética forestal y las razones que justifican su estudio se puede consultar el libro de White *et al.* (2007).

Cronología del Mejoramiento Genético de Eucaliptos en Chile

Sin lugar a dudas el papel de INFOR en la consolidación del eucalipto ha sido clave en el desarrollo forestal del país, ya que mediante la adquisición del germoplasma a Australia (Colecciones de Progenie y Procedencia) se han establecido las bases para que las empresas forestales, grandes, medianas y pequeñas, en forma individual o mediante colaboraciones, puedan usar esta especie con propósitos comerciales y lograr en definitiva su desarrollo industrial y/o forestal. En este arduo trabajo es necesario destacar la valiosa contribución al desarrollo del eucalipto en Chile, de los Ingenieros Forestales, Sres. José Antonio Prado Donoso y Santiago Barros Asenjo.

A continuación se hace una reseña de los principales hitos de la historia del eucalipto en Chile.

A partir de 1963: INFOR establece una red de ensayos de Introducción de Especies de *Eucalyptus* en distintas zonas edafoclimáticas. Los resultados obtenidos para las especies fueron muy variables (Cuadro N° 1).

1979: INFOR con el apoyo de FAO culmina un proceso de evaluación completa de su red de ensayos de introducción de especies y genera informes (Barros *et al.*, 1979a y Barros *et al.*, 1979b) con toda la información reunida hasta ese año, con los resultados disponibles ensayo a ensayo y una evaluación de su cobertura y proyección geográfica según Unidades Edafoclimáticas definidas en estos estudios para el país.

1981: INFOR organiza en Santiago, con el apoyo de CORFO, el Seminario Nuevas Especies Forestales de Interés Económico para Chile. En este encuentro técnico se

entrega información sobre las especies más destacadas en los ensayos de introducción de especies en diferentes lugares de país y ya provoca gran interés entre propietarios y empresas la adaptación y crecimiento que están mostrando para la parte central y sur de Chile especies como *Eucalyptus camaldulensis*, *E. cladocalyx*, *E. globulus*, *E. delegatensis*, *E. nitens*, *E. regnans*, *E. sideroxylon* y otras.

1986: INFOR publica un libro (Prado *et al.*, 1986) con información de resultados de introducción de especies forestales para todo el país, en el cual se destaca los principales resultados obtenidos hasta ese año, por grandes regiones del país y según las Unidades Edafoclimáticas antes definidas, demarcando así la proyección geográfica posible de los resultados de crecimiento de las diferentes especies.

1988: INFOR organiza en Viña del Mar, con el apoyo de CORFO, el Simposio Internacional Manejo Silvícola del Género *Eucalyptus*, en el cual los resultados que INFOR muestra sobre crecimiento de diferentes especies del género, sumados a aquellos obtenidos por diversas investigaciones complementarias de INFOR sobre viverización de plantas y técnicas de establecimiento de plantaciones, incrementan el interés de forestadores y empresas por los eucaliptos.

1988: Empresas forestales comienzan a establecer plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* en el valle central. INFOR propicia y discute un Plan de Mejoramiento Genético para Chile e introduce 2 importantes colecciones de semillas, en las que está representada la mayor parte de la distribución natural de *E. globulus* y *E. camaldulensis*, para establecer los primeros ensayos de progenie y procedencia en 1989.

1989: INFOR publica libro sobre silvicultura y manejo de eucaliptos (Prado y Barros, 1989) en el que se entrega los resultados más destacados de especies del género *Eucalyptus* en los ensayos de introducción de especies, según grandes regiones y Unidades Edafoclimáticas, además de completa información sobre manejo de semillas, producción de plantas, técnicas intensivas de establecimiento de plantaciones, crecimiento y manejo.

1989: INFOR introduce la primera colección de *E. nitens* de gran parte de la distribución natural de la especie.

1990: INFOR establece una red de ensayos de progenie y procedencia de *E. nitens* entre las Regiones del Bio Bio y los Ríos. Se inician los programas de mejoramiento genético de las empresas forestales. Paralelamente, en conjunto con la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, se utilizó la técnica de isoenzimas con el fin encontrar patrones de diferencias a nivel de procedencias en la colección de *E. globulus* adquirida por INFOR en Australia en 1988 (Colección Gardiner y Crawford). Para lo cual la técnica demostró ser bastante eficiente.

1991: INFOR plantea las bases para el primer programa de mejoramiento genético de especies del género *Eucalyptus* en el país (Infante *et al.*, 1991) para las principales especies del género seleccionadas de los ensayos de introducción de especies.

1991: INFOR introduce una colección de semillas que representa la distribución natural de *E. delegatensis* para establecer los 2 primeros ensayos en 1992 en la Región de La

Araucanía. Forestal Monteáguila realiza los primeros cruzamientos para la obtención de híbridos de *Eucalyptus*. Paralelamente CMPC inicia la primera producción de pulpa con *E. globulus* en la planta Santa Fe de Nacimiento. Este mismo año 1991, en Convenio con la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile, se utilizó la técnica de isoenzimas para estudiar patrones de similitud entre árboles colectados (raza local) entre las Regiones de Coquimbo y Los Lagos, incluyendo algunos árboles plus de empresas forestales. En este estudio y utilizando la información obtenida anteriormente de patrones de electroforesis para procedencias naturales, se pudo constatar la existencia de una procedencia única para la raza local de *E. globulus* (Geeveston, Tasmania).

1992: INFOR introduce una colección de *E. viminalis* y otra de *E. sideroxylon* que en cada caso abarcaban la distribución natural de la especie.

1993: Se establece 2 ensayos de progenies de *E. viminalis*, uno en la Región del Bio Bio (valle central) y otro en la Región de Los Ríos. En el caso de *E. sideroxylon* se establecen dos ensayos en la Región de Coquimbo, uno en la costa y otro en el interior. Adicionalmente se introduce una colección de genotipos de *E. globulus* tolerantes al frío obtenido desde programas de mejoramiento genético de USA, Chile y Australia. Se estableció 3 ensayos de progenies en zonas extremadamente frías, no se detectaron individuos de *E. globulus* tolerantes al frío. También se ha definido a *E. cladocalyx* como una especie muy interesante para las zonas áridas y se introduce un conjunto de procedencias que fueron establecidas en ensayos en los mismos lugares que *E. sideroxylon*. Este año también se valida los primeros resultados de los ensayos de progenie de *E. globulus* establecidos por INFOR y se introduce una segunda colección con las mejores procedencias para Chile y un número significativo de familias en cada una de ellas. Se inicia el programa de propagación clonal de la Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal, donde se desarrollarían los protocolos de clonación de fenotipos seleccionados de *E. globulus*.

1993: INFOR organiza en Pucón, con el apoyo de CORFO, el Simposio Internacional los Eucaliptos en el Desarrollo Forestal de Chile, en el cual entrega resultados para las principales especies y también de algunas procedencias de ellas, de plantaciones experimentales ya por sobre los 15 años de edad.

1994: Se establece 2 nuevos ensayos de progenies de *E. globulus* con la segunda colección traída de Australia (Regiones del Bio Bio y La Araucanía). Por su parte la empresa Monteáguila ha iniciado el estudio de clonación de algunos fenotipos importantes de *E. globulus* y establece el primer ensayo clonal a partir de enraizamiento de estacas. INFOR inicia el estudio de protocolos de micro propagación de *Eucalyptus globulus*, *E. nitens* y *E. camaldulensis*.

1995: Se evalúa los resultados de los primeros ensayos de progenie de *E. nitens* establecidos por INFOR y se selecciona las mejores procedencias para Chile. INFOR, adquiere en Australia la segunda colección de la especie donde se incluye principalmente procedencias del estado de Victoria y solo 2 de Nueva Gales del Sur. Esta nueva colección fue denominada Victoria Central. La empresa Monteáguila realiza los primeros cruzamientos controlados para *E. globulus* con el sistema OSP (One Stop Pollination).

- 1996:** Se establece 3 ensayos de progenie de *E. nitens* de la colección Victoria Central (2 en la Región del Bio Bio y uno en la Región de Los Ríos).
- 1997:** En conjunto con la Universidad de Concepción INFOR utiliza la técnica de amplificación de polimorfismos de ADN al Azar (RAPD) para analizar la variación genotípica en 7 individuos de *Eucalyptus nitens* de 4 procedencias geográficas diferentes y de 2 individuos no relacionados (uno posiblemente híbrido, *E. nitens* x polen desconocido). En este mismo año se determina las áreas potenciales para el establecimiento de plantaciones con *Eucalyptus globulus*, *E. nitens* y *E. camaldulensis*.
- 1998:** INFOR inicia la promoción del uso de semilla genéticamente mejorada y la generación de *stock* de semilla para su disponibilidad para viveristas forestales.
- 1999:** Se realiza una prospección fitosanitaria de plantaciones y ensayos de *Eucalyptus* describiendo las principales plagas y daños detectadas especialmente para *E. globulus* y *E. nitens*.
- 2000:** Instalación Huerto Semillero Clonal con árboles de alta productividad de *E. globulus* seleccionados en *ranking* genético en todos los ensayos de progenies de INFOR.
- 2001:** INFOR organiza en Valdivia el Simposio internacional IUFRO Desarrollando el Eucalipto del Futuro, dentro del marco de las actividades de la Unidad IUFRO 2.08.03 *Improvement and Culture of Eucalypts*, de la cual INFOR forma parte. Especial atención se presta ya al mejoramiento genético de diferentes especies del género
- 2001:** Se inicia el proyecto Captura de Genotipos para el Desarrollo de una Raza de *Eucalyptus globulus* Tolerante al Frío, ejecutado por INFOR y la Cooperativa de Mejoramiento Genético, en el cual se selecciona alrededor de 1.500 árboles de *E. globulus* con tolerancia al frío en sitios marginales para la especie.
- 2003:** Forestal Mininco establece los primeros Huertos Semilleros Clonales de *E. globulus* con Manejo intensivo y, paralelamente, se crea el Consorcio de Genómica Forestal entre la Universidad de Concepción, Arauco SA, Forestal Mininco SA y CEFOR SA.
- 2004:** INFOR inicia un vasto programa de hibridación de especies de *Eucalyptus* con el fin de conferir tolerancia a la sequía a *Eucalyptus globulus*.
- 2005:** Establecimiento Huerto Semillero Clonal de *E. nitens* en predio Antiquina, Comuna de Cañete, Región del Bio Bio. Se seleccionó según *ranking* genético los árboles de mayor crecimiento y mejor forma en todos los ensayos de progenie establecidos por INFOR con la primera colección australiana de la especie. Adicionalmente, se establece los primeros ensayos clonales con *E. camaldulensis* tolerante a la sequía en 3 sitios de las Regiones de Coquimbo y Valparaíso.
- 2006:** Forestal Mininco SA inicia el Desarrollo de Huella Genética de identidad para *Eucalyptus*. TAAG Genetics-CMPC.
- 2007:** Se establece el primer Huerto Semillero Clonal de *E. regnans* en la Provincia de Arauco, Región del Bio Bio. El material genético seleccionado corresponde a

árboles de alta productividad seleccionados para la producción de madera aserrada y debobinado.

2008: Se inicia el proyecto Generación y Producción de Plantas de *Eucalyptus globulus* Tolerantes a la Sequía, desarrollado por INFOR e INIA, en el cual se utiliza dos estrategias para definir individuos tolerantes a la sequía; selección de raza tolerante a la sequía y aplicación de transgenie con genes que confieren tolerancia a la sequía.

2008: Se registra en SAG el primer clon híbrido de *Eucalyptus* tolerante a la sequía *E. globulus* x *E. tereticornis*.

2010: INFOR-INIA registran genes ortólogos del género *Eucalyptus* (a partir de *E. cladocalyx* y *E. camaldulensis*) que conferirían tolerancia a la sequías a *E. globulus*.

2011: Las actualizaciones anuales de superficie de plantaciones forestales que INFOR realiza en Chile arrojan ya una superficie de plantaciones de eucaliptos en el país superior a las 740 mil hectáreas, compuestas por 524 mil hectáreas de *Eucalyptus globulus* y 217 mil hectáreas de *E. nitens* (INFOR, 2013), y a esto se suman superficies incipientes de otras especies del género como *E. camaldulensis*, *E. cladocalyx*, *E. delegatensis*, *E. regnans* y *E. viminalis*.

2012: INFOR organiza en Pucón el Congreso Internacional Eucaliptos Mejorados para Aumentar la Competitividad del Sector Forestal en América Latina, en el cual se expone y revisa diferentes programas de mejoramiento genético con especies de *Eucalyptus* en Chile y otros países, como Australia, Brasil, Argentina y Sudáfrica.

2013: Se planta el primer huerto semillero clonal de *E. nitens* con el objeto de producir madera sólida de alto valor. Este proyecto es el resultado de una colaboración entre el ProNitens AG, Forestal Mininco SA e INFOR.

Cuadro N° 1
RESUMEN DE RESULTADOS DE CRECIMIENTO PARA DISTINTAS ESPECIES DE *Eucalyptus*
INTRODUCIDAS EN CHILE

Especies	Volumen (m ³ /ha)	IMA (m ³ /ha/año)	Precipitación Media (mm/año)	Período Seco (Meses)
<i>E. camaldulensis</i>	19 - 357	1 - 36	115 y 500 a 700	9 - 6
<i>E. cladocalyx</i>	14 - 115	1 - 8	115 - 500	> 9 - 6
<i>E. delegatensis</i>	564 - 857	30 - 43	700 - 5000	3 - 0
<i>E. fastigata</i>	422	26,4	>700	6 - 7
<i>E. globulus ssp bicostata</i>	28 - 292	2 -19	250 - 700	9 - 6
<i>E. globulus ssp globulus</i>	208 - 664	13 - 44	>700 - 2000	0 - 7
<i>E. nitens</i>	659 - 1152	41,2 - 77	700 - 2000	1 - 6
<i>E. regnans</i>	237 - 775	16 - 63	> 700 – 5000	7 - 0
<i>E. sideroxylon</i>	45	3	330	7
<i>E. viminalis</i>	207	13	2000-2500	0

El volumen y los incrementos medios anuales corresponden a los valores extremos, estimados a partir de parcelas experimentales a la edad de 15 años, según datos aportados por Prado et al. (1986).

Aspectos Relevantes del Mejoramiento Genético de Eucaliptos

- Desarrollo de Híbridos para Mejorar la Productividad

Debido a la buena calidad de la pulpa de *E. globulus* y *E. nitens*, la búsqueda de otras opciones para continuar optimizando el desarrollo industrial ha sido lenta. Aún así, la necesidad de desarrollar material genético idóneo para enfrentar factores ambientales adversos ha motivado la incursión en el tema de la hibridación. El híbrido entre *E. globulus* y *E. nitens* tiene características intermedias, tanto en la pulpa como en las características tecnológicas de la madera, y lógicamente el *E. nitens* le transfiere al híbrido más resistencia al frío que la que posee intrínsecamente *E. globulus*, que junto a la escasa tolerancia al estrés hídrico, es uno de los factores limitante de esta especie en Chile. Una vez producidos y probados, estos híbridos, pueden ser propagados vegetativamente y multiplicados en extensas áreas. El desarrollo de híbridos con rasgos de adaptabilidad puede hacer a las plantaciones comerciales económicamente atractivas en suelos que alguna vez no fueron aptos para la silvicultura (Ipinza, 1998).

- Las Ventajas de la Propagación Vegetativa

Los programas de propagación vegetativa mediante estacas enraizadas, en especial en *E. globulus* y *E. camaldulensis*, generalmente constituyen una importante alternativas para pequeñas y medianas empresas, lamentablemente la adopción de esta tecnología en Chile ha sido lenta, por lo que se ha perdido la posibilidad de traspasar a operación las ganancias genéticas obtenidas en los programas de mejoramiento genético. A pesar de lo anterior, el enraizamiento de estacas es un método muy sencillo y común en otros países como España, Portugal y los países tropicales, se presume que se va popularizar cada día más.

La organogénesis somática involucra la inducción separada de raíces y brotes a partir de callos no organizados o de yemas preformadas o inducidas. Aunque se ha desarrollado para muchas especies, en términos de masificación operacional a gran escala no se utiliza en más de 5 especies forestales. La embriogénesis somática es un proceso de formación de embriones somáticos a partir de yemas y ápices radiculares, esos embriones germinan y dan origen a una planta. A diferencia de la organogénesis, la embriogénesis somática produce plantas que se desarrollan en forma bipolar, como los embriones cigóticos naturales. El uso de la embriogénesis somática se encontraba en una escala pre-operativa en 1996 en *Pinus radiata* en Nueva Zelanda, sin embargo en eucaliptos aún continúa siendo materia de investigación.

- Aspectos Cuantitativos

A medida que un programa de mejoramiento se mueve hacia generaciones avanzadas, aumenta la cantidad de datos de los genotipos individuales, aumentan los parientes y se van produciendo diferentes clases de datos; de ensayos de campo tradicionales, de estudios en invernaderos, de resistencia a plagas y enfermedades, de resistencia al frío, de calidad de la madera (densidad, longitud de fibra, rendimiento pulpable) y, posiblemente, información sobre marcadores moleculares asociados a característica de importancia económica (Ipinza, 1998).

La colecta de esos datos ha sido, es y continuará siendo uno de los componentes relevantes de los programas de mejora genética, por lo tanto es extremadamente importante un análisis apropiado para maximizar las ganancias genéticas. Las técnicas de índices de

selección, BLUP (el mejor predictor lineal insesgado) se ha vuelto una herramienta de uso común, gracias al esfuerzo de muchos investigadores en especial a los Drs: Nuno Borralho (Borralho, 1995) y Luis Apolaza (<http://apiolaza.net/asreml-r/>). A esto hay que agregar una tecnología emergente como lo es el *Gibbs Sampling*, que ha sido utilizada con éxito en el mejoramiento genético forestal (Fernández *et al.*, 1998) y la de las redes neurales artificiales (Illiadis *et al.*, 2013) que ha sido utilizada para predecir la densidad de la madera.

- **Mecanismos de Selección**

El método de mejoramiento genético forestal que actualmente se utiliza hace uso de la variación fenotípica y las relaciones de parentesco para seleccionar a los individuos que participan del programa. A partir de ellos genera familias de hermanos completos o medios hermanos que se establece en terreno y evalúa en el tiempo. El método también considera selección intrafamiliar para identificar a los mejores individuos y masificarlos mediante clonación. En los procesos de selección y se evaluación utiliza modelos mixtos para descomponer la varianza total, con el objeto de predecir los valores genéticos aditivos. Para este efecto calcula el mejor predictor lineal insesgado del valor genético de cada individuo (BLUP, por su sigla en inglés), valor que es usado para seleccionar los mejores fenotipos para plantaciones o para iniciar un nuevo ciclo de mejoramiento (Zapata-Valenzuela y Hasbún, 2011).

Esta forma usada en la actualidad para hacer mejoramiento genético forestal, tiene como limitante el hecho que la estimación del genotipo se basa únicamente en el fenotipo, el cual está afectado por la variación ambiental y la variación interna debido a efectos de dominancia y epistasis (White *et al.*, 2007). Aún así, esta metodología tradicional ha permitido lograr importantes ganancias genéticas en programas de mejora forestal, pero como cualquier estrategia basada en ensayos forestales en terreno exige una importante inversión en recursos, logística y extensos ciclos de selección antes de lograr resultados significativos de las características a mejorar.

- **La Irrupción de la Biotecnología**

La biotecnología ha tenido un gran impacto en los cultivos agronómicos y algunas investigaciones y aplicaciones se han efectuado en árboles forestales, sin embargo la dificultad de la biotecnología forestal radica en que los árboles son organismos de gran tamaño y su genoma es muy heterocigótico. Por otro lado, no resulta fácil aplicar las técnicas moleculares a las plantas leñosas. Existen varias técnicas biotecnológicas que pueden ser útiles a los programas de mejora genética forestal, tales como: Mapeo de genes, selección asistida por marcadores moleculares e ingeniería genética. Estas técnicas biotecnológicas permiten aumentar el conocimiento básico de la genética forestal, permitiendo lograr algunas mejoras genéticas adicionales que pueden ser difíciles de alcanzar con las técnicas tradicionales. Las técnicas biotecnológicas no reemplazan a los programas clásicos de mejora genética, sino que son complementarios a estos, aunque sin duda están revolucionando sus avances y tendrán una participación creciente y gravitante en los programas futuros de mejora forestal.

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS, DESAFÍOS Y TENDENCIAS FUTURAS

Como sugiere Griffin (2008), en condiciones óptimas, los eucaliptos que tradicionalmente son objeto de cultivo expresan un gran crecimiento medio anual, de modo que parece difícil pensar que este crecimiento pueda seguir aumentándose de manera muy

considerable mediante mejoramiento genético. Por lo mismo, los esfuerzos del mejoramiento deberán dirigirse a aumentar el rango de sitios donde este rendimiento pueda ser obtenido. Así, si se mejora la resistencia o tolerancia a distintos factores de estrés que limitan la productividad, se podrá aumentar el rendimiento en distintos sitios que actualmente resultan subóptimos para el cultivo de estas especies. Análogamente, se podrán obtener incrementos de interés al explotar la variabilidad genética de otras características de interés productivo distintas al crecimiento y la tolerancia a condiciones adversas; las propiedades de la madera por ejemplo, son atributos que han sido escasamente considerados y respecto de las cuales se podrá hacer progresos considerables en función de las demandas y requerimientos de productos específicos que usan a la madera como materia prima.

Por otra parte, parece evidente que las aplicaciones biotecnológicas tendrán un rol preponderante en el futuro del mejoramiento genético de los eucaliptos. La selección asistida por marcadores moleculares, la selección genómica, la transformación genética y otras ofrecen dotar a los programas de mejora de una dinámica y eficiencia nunca antes vista en especies forestales.

De acuerdo a Lee (2013) el área de la genómica se mueve rápido, primero fue el mapeo del genoma humano, seguido por el del arroz, del ratón y del pollo. Recientemente los primeros árboles que han sido secuenciados son el *Populus trichocarpa*, el 2006, luego el *Eucalyptus grandis*, *Castanea dentata*, *Pinus taeda*, y seguramente seguirá *Picea abies*. La siguiente generación de secuenciadores (NGS) de acuerdo a Neale y Kremer (2011) provee a los árboles forestales una importante herramienta para aumentar el conocimiento molecular de historia de vida compleja y adaptación a distintos ambientes.

Selección Asistida

El interés por acelerar los programas de mejora genética mediante selección asistida por marcadores moleculares ha sido objeto de diversos proyectos de biotecnología forestal (Zapata-Valenzuela y Hasbún, 2011). El procedimiento general se basa en que los modelos lineales pueden incorporar como variable predictiva a los QTL, es decir a segmentos de genoma que contienen uno o más genes estadísticamente asociados a una característica cuantitativa (*Quantitative Trait Loci*, o QTL).

La construcción de mapas genéticos ha permitido identificar marcadores ligados a QTL reguladores de crecimiento, propiedades de la madera y tolerancia a enfermedades y otras formas de estrés (Grattapaglia y Kirst, 2008). No obstante, existe cierto consenso en señalar que su implementación en especies forestales ha sido ineficiente, debido a que la asociación entre el QTL y su marcador es válida sólo para una estructura poblacional específica (intrafamiliar); su detección requiere una población segregante (retrocruzas o generación F2); y a que existe un limitado desequilibrio de ligamiento que es característico de genomas complejos (Neale, 2007; Grattapaglia y Resende, 2010).

Quizás la alternativa más avanzada, gracias al desarrollo del genoma humano, es la selección basada en asociación genética, mediante estudios de mapeo asociativo. En este caso, el objetivo es detectar asociaciones significativas entre marcadores polimórficos de un solo nucleótido (SNP, *Single Nucleotide Polymorphism*) y observaciones fenotípicas, detalles de esta tecnología que seguramente se convertirá en el estándar en estudios forestales pueden ser vistos en Woolliams (2013). Según Zapata-Valenzuela y Hasbún (2011) estos marcadores

son estables y abundantes en el genoma y permiten cubrir mayores segmentos cromosómicos.

Alternativamente, el mejoramiento genómico que analiza el genoma en forma amplia, representa un inexplorado potencial de aplicación, un ejemplo de esto es la selección genómica o selección basada en el uso simultáneo de miles de marcadores dispersos en el genoma.

La selección genómica se basa en valores predichos en función de los efectos de marcadores moleculares distribuidos en todo el genoma del individuo, de modo que con una adecuada densidad de marcadores, los genes que influyen la característica deberían estar en desequilibrio de ligamiento (estrechamente unidos) con al menos un marcador. En otras palabras, se aprovecha la existencia de asociaciones no aleatorias entre alelos favorables que son heredados por los individuos de una población y que se espera sean detectados en todo el genoma.

El disponer de mapas genómicos, sumado al avance bioinformático y constante reducción de los costos de genotipificación masiva, permitirá incorporar mapas de marcadores de alta densidad en estrategias de selección genómica aumentando su eficiencia, particularmente para características de baja heredabilidad ($h^2 < 0,3$), donde la selección tradicional es más difícil de implementar con suficiente certeza (Zapata-Valenzuela y Hasbún, 2011).

La selección genómica ha revolucionado el mejoramiento de animales productores de leche durante la última década y puede tener un gran impacto en el mejoramiento forestal (Zapata-Valenzuela y Hasbún, 2011). De hecho, resultados obtenidos con *Eucalyptus grandis* (Grattapaglia et al., 2011) y *Pinus taeda* (Resende et al., 2011; Zapata-Valenzuela et al., 2011) confirman la efectividad de esta forma de selección, aunque se reconoce que se requieren algunos estudios adicionales.

Ingeniería Genética

La ingeniería genética tiene que ver con la identificación del ADN que codifica para una característica determinada, luego el ADN se copia e inserta dentro del genoma de un árbol individual que no contenía este gen. En algunos países hay una resistencia del público a utilizar plantas transgénicas. En relación a la aceptación del público, la biotecnología forestal tiene una importante ventaja sobre los productos agrícolas, y es que los productos forestales no son alimentos de consumo humano. La desventaja radica en que los árboles forestales normalmente ocupan grandes extensiones de terreno y los árboles son más longevos que los cultivos agrícolas, por lo que aumenta la probabilidad de escape de los organismos transgénicos. La presencia de plantaciones con árboles transgénicos puede ser menos problemática en países donde la silvicultura está basada en especies exóticas y donde no existe posibilidad de cruzamientos con las especies nativas, que es el caso de Chile. Las especies de *Eucalyptus*, solo se han encontrado a nivel de fósil, en América del Sur, por lo que árboles transgénicos con esta especie no contaminarían recursos naturales.

En la actualidad las barreras para el desarrollo y utilización de la transgenia en el ámbito forestal parecen ser más de carácter regulatorio o reglamentario que de factibilidad técnica, siendo la incompatibilidad de la transformación genética con la certificación FSC (Forest Stewardship Council) un importante factor que reduce el interés por su utilización. Aun así, la ingeniería genética es ciertamente una poderosa herramienta que muy probablemente podrá ser usada para realizar importantes cambios en los futuros árboles forestales.

No obstante, en este libro se dedica un apartado a la importancia de la ingeniería genética en el contexto agrícola - forestal. Pero es en el libro “Forest and Genetically Modified Tree” (FAO, 2010) (<http://www.fao.org/docrep/013/i1699e/i1699e.pdf>), donde se hace un exhaustivo análisis de cómo la ingeniería genética, tanto desde el punto de vista técnico como del ético, ambiental, social, regulatorio y de su comercio, está contribuyendo al desarrollo de la humanidad, y demuestra que no existe información científica contradictoria que atente en contra del ser humano. En este contexto se recomienda la lectura de este libro para tener una opinión independiente, ya que inevitablemente el desarrollo forestal de las especies de rápido crecimiento pasará por la ingeniería genética.

CONCLUSIONES

El propósito de este libro es dar un pequeño paso, en pos de mostrar la información pública sobre el desarrollo del eucalipto, y buscar los elementos orientadores que permitan seguir caminando para conducir hacia un desarrollo socialmente más integrador de esta especie y de sus beneficios a la comunidad. En este sentido y acuñando las palabras de don Gonzalo Paredes Veloso (QEPD), mediante el uso del eucalipto, esta especie multipropósito, Chile puede alcanzar una mayor equidad social en el sector forestal.

REFERENCIAS

Barros, S.; Rojas, P.; Barros, D.; Navia, P.; Vita, A.; Toro, J. y Cogollor, G., 1979. Informe I. Situación Actual de los Programas de Introducción de Especies Forestales en Chile. Proyecto CONAF/PNUD/FAO/CHI –76 – 003. Instituto Forestal–Universidad de Chile. 386 p. Mapas y Anexos.

Barros, S.; Prado, J.A.; Elgueta, H.; Rojas, P.; Barros, D.; Navia, P.; Vita, A.; Cogollor, G.; Toro, J. y Caldentey, J., 1979a. Informe II. Áreas Cubiertas por Ensayos de Introducción de Especies y Ubicación de Nuevas Experiencias. Proyecto CONAF/PNUD/FAO/CHI – 76 – 003. Instituto Forestal–Universidad de Chile. 90 p. Mapas y Anexos.

Borralho, NMG., 1995. The Impact of Individual Tree Mixed Models (BLUP) in Tree Breeding Strategies. CRCTHF-IUFRO, Hobart, pp. 142-145

Burdon, R., 1995. Future direction in tree breeding: Some questions of what we should seek, and how to manage the genetic resource, In; Proceeding of 25th Meeting of the Canadian Tree Improvement Association, Part 2, CTIA / WFGA Conference: “Evolution and tree breeding advances in quantitative and molecular genetics for population improvement”, Lavereau, J. (ed.). Victoria, BC, 28 Aug – 1 sept. 1995. Pp: 24-39.

Eldridge, K.; Davidson, J.; Harwood, C. y van Wyk, G., 1994. Eucalypt Domestication and Breeding. Clarendon Press – Oxford. 288 p.

Falconer, D S., and Mackay, TFC., 1996. Introduction to Quantitative Genetics. Pearson Education Limited, Essex, UK.

FAO, 2010. Forest and Genetically Modified Trees. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2010. 235 p.

Fernández, A., Rodríguez, M. y Ipinza, R., 1998. Estimación bayesiana de parámetros genéticos y efectos de procedencia de caracteres de crecimiento en *Eucalyptus nitens*. ITEA. Producción animal. 01/1998; 94(3):279-289, 18 Ref.

Fonseca, S.M.; Resende, M.D.V.; Alfenas, A.C., Guimarães, L.M.S.; Assis, T.F. y Grattapaglia, D. 2010. Manual Prático de Melhoramento Genético do Eucalipto. Editora UFV. Viçosa-MG, 2010. 200p.

Gandolfo, M.A., E.J. Hermesen, M.C. Zamalao, K.C. Nixon, C.C. González, P. Wilf, R. Cúneo & K.R. Johnson, 2011. Oldest known *Eucalyptus* macrofossils are from South America. Plos One 6(6): e21084. doi:10.1371/journal.pone.0021084.

- Grattapaglia, D. y Kirst, M., 2008.** *Eucalyptus* applied genomics: from gene sequences to breeding tools. *New Phytologist* 179(4):911-929.
- Grattapaglia, D. y Resende, M., 2010.** Genomic selection in forest tree breeding. *Tree genetics and genome* 7(2):241-255.
- Grattapaglia, D.; Resende, M.; Sansaloni, C.; Petroli, C.; Missiaggia, A.; Takahashi, E.; Zamprogno, K. and Kilian, A., 2011.** High realized accuracies of genomic selection for volume growth and wood density in *Eucalyptus* breeding populations with contrasting effective sizes. En: http://www.intl-pag.org/19/abstracts/w35_pagxix_235.html.
- Griffin, R., 2008.** Entrevista Prof. Dr. Rod Griffin. Genetista de *Eucalyptus*. Ex - Director del CRC en Australia. En: Boletín del CIDEU 6-7: x-xiii ISSN 1885-5237.
- INFOR, 2013.** Anuario Forestal 2013. Boletín Estadístico N° 140. Instituto Forestal, Chile.
- Infante, P., Ipinza, R. y Prado, J., 1991.** Bases para la mejora genética de las especies del género *Eucalyptus* en Chile. Ciencia e Investigación. Vol. 5, N°1.
- Illiadis, L., Mansfield, S., Avramidis, S. y El-Kassaby, Y., 2013.** Predicting Douglas-Fir wood density by artificial neural networks (ANN) based on progeny testing information. *Holzforschung*. pp. 1-7.
- Ipinza, R., 1998.** Importancia del mejoramiento genético a nivel mundial. En: Ipinza, R., Gutiérrez, B. y Emhart, V. (eds). Curso Mejora Genética Forestal Operativa. UACH-INFOR-CONAF. Valdivia, Chile. Pp: 1-26.
- Ipinza, R., 2000.** Modelo Básico de Mejora Genética. En: Domesticación y Mejora Genética de Raulí y Roble. Editado por Roberto Ipinza, Braulio Gutiérrez y Verónica Emhart; Editora e Imprenta Maval Ltda. Pp: 197-213
- Lee, S., 2013.** Foreword. Successes of Tree Breeding: What has been achieved and does it need help? En: Novel Tree Breeding. Editado por Steve Lee y John Woolliams. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. pp. 7-12.
- Namkoong, G., Kang, H. y Brouard, J., 1988.** Tree Breeding: Principles and Strategies. Springer - Verlag. 180 p.
- Neale, D., 2007.** Genomics to tree breeding and forest health. *Current Opinion in Genetics & Development* 17: 539-544.
- Neale, D. and Kremer, A., 2011.** Forest tree genomics: growing resources and applications. *Nat Rev Genet* 12: 111-122.
- Mora, C., 2009.** Rapid Techniques for Screening Wood Properties in Forest Plantations. A Dissertation Submitted to the Graduate Faculty of The University of Georgia in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy Athens, Georgia. 208 p.
- Prado, J. A., Barros, S.; Wrann, J.; Rojas, P.; Barros, D. y Aguirre, S., 1986.** Especies Forestales Exóticas de Interés Económico para Chile. Instituto Forestal - Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 168 p.
- Prado, J. A. y Barros, S. (Eds), 1989.** *Eucalyptus*. Principios de Silvicultura y Manejo. Instituto Forestal - Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 197 p.
- Raymond, C., 2002.** Genetics of *Eucalyptus* wood properties. *Ann. Forest. Sci.* 59: 525-531.
- Raymond, C. y Apiolaza, L., 2004.** Incorporating wood quality and deployment traits in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. In: Walter, P. and Carson, P. (eds). Plantation Forest biotechnology for the 21st century. Cap 5. Pp: 87-99.
- Resende, M.F.; Acosta, J.; Muñoz del Valle, P.; Quesada, T.; Davies, J.; Resende, M.D. and Kirst, M., 2011.** Genomic selection and next generation genotyping to hyperaccelerate Pine breeding. En: http://www.intl-pag.org/19/abstracts/w35_pagxix_236.html.
- Syrach Larsen, C., 1956.** Genetics in Silviculture. Translated by Mark L. Anderson. Olver and Boyd LTD., Edinburgh. 224 p.

Tibbits, W.; Boomsma, D.; and Jarvis, S., 1997. Distribution, biology, genetics, and improvement Programs for *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* around the world. In: Proceedings of the 24th biennial southern tree improvement conference. Pp: 9-12

White, T.L.; Adams, W.T. and Neale, D.B., 2007. Forest Genetics. Cambridge, USA. CABI Publishing CAB International. 682 p.

Woolliams, J., 2013. Genome wide selection: a radical re-think or more of the same? En: Lee, S. y Woolliams, J. (Eds). Novel Tree Breeding. Chapter 3. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Pp: 37-51.

Zapata-Valenzuela, J. y Hasbún, R., 2011. Accelerated forest genetic breeding using genomic selection. Bosque 32(3):209-213.

Zapata-Valenzuela, J.; Isik, F.; Maltecca, C.; Wegrzyn, J.; Neale, D. and Whetten, R., 2011. Genomic selection in a cloned population of Loblolly Pine. En: http://www.intl-pag.org/19/abstracts/W35_PA-GXIX_237.html



2. LOS EUCALIPTOS EN EL MUNDO

Santiago Barros A.¹

ORIGEN Y DISTRIBUCIÓN NATURAL

Los eucaliptos son unas 950 especies (Bush, 2011) pertenecientes a la familia *Myrtaceae*, muy mayoritariamente nativas y endémicas de Australia, solo unas pocas especies se extienden en su distribución natural hacia territorios insulares al norte de Oceanía y sur de Asia; Papúa Nueva Guinea y Timor, sur de Indonesia y sur de Filipinas (Slee *et al.*, 2006) (Figura N° 1).

Son especies que se han adaptado a una gran variedad de condiciones ambientales, aparecen como los árboles dominantes en las áreas de mayores precipitaciones de Australia y tienen una representación menor en las zonas más secas. Los bosques naturales de eucaliptos ocupan una superficie de más de 115 millones de hectáreas, sin embargo en Australia consideran esta cifra una estimación variable, dependiente de la definición de bosque.



Figura N° 1
DISTRIBUCIÓN NATURAL DE LOS EUCALIPTOS

Entre los eucaliptos hay desde grandes árboles, como *Eucalyptus regnans* F. Muell. (Mountain Ash), especie originaria del SE de Australia, Estados de Victoria (VIC) y Tasmania (TAS), y *Eucalyptus delegatensis* R. T. Baker (Alpine Ash), de similar distribución, que son considerados los árboles más altos del mundo, superando los 100 m de altura el primero, y alcanzando alturas cercanas a 100 m el segundo (Hickey *et al.*, 2000), hasta arbustos pequeños de 1 m o menos de altura, que prosperan en condiciones ambientales extremas (Brooker *et al.*, 2000).

¹ Ingeniero Forestal U. de Chile. Instituto Forestal. Dirección Ejecutiva. sbarros@infor.cl

El primer eucalipto descrito fue *Eucalyptus obliqua* L'Hér. (Messmate Stringybark) y su descripción la efectuó el botánico francés L' Hérítier de Brutelle en 1788, quién le dio el nombre al género, usando muestras colectadas en Tasmania por el Capitán Cook². El nombre del género deriva del griego *eu* y *calypto*, que significa bien cubierto y se refiere al opérculo de la yema floral que protege las estructuras reproductivas durante su desarrollo. *Obliqua* en tanto proviene del griego *obliquus*, que significa oblicuo y alude a la asimetría de las hojas.

CLASIFICACIÓN BOTÁNICA

Desde que L' Heritier puso el nombre al género muchas otras especies han sido descritas y se han propuesto diversas clasificaciones taxonómicas, sin embargo los eucaliptos, además de su variedad de tamaños, presentan una muy amplia gama de características morfológicas en flores y frutos, hojas y corteza, razón por la que no siempre existe consenso entre los botánicos.

Brooker *et al.* (2000) comentan que Cavanilles en 1797 describió un género adicional, *Angophora*; que Mueller en 1858 hizo una clasificación basada en el tipo de corteza; que Bentham en 1867 dividió el género *Eucalyptus* en cinco series usando las características de las anteras; que von Mueller en 1884 planteó otra clasificación basada en las anteras; y que Maiden en 1924 también lo hizo estudiando las anteras y que su clasificación fue tomada posteriormente por Blakely en 1934.

Slee *et al.*, 2006 señalan que Pryor y Johnson en 1971 concibieron una clasificación de todos los eucaliptos conocidos, separándolos en siete grandes grupos (subgéneros) sobre la base de la asociación de numerosos caracteres morfológicos, sistema que ha sido revisado posteriormente por el mismo Johnson y otros especialistas; que Briggs y Johnson en 1979 efectuaron un completo análisis de la familia *Myrtaceae* en todos sus géneros sobre la base de la estructura floral; que Chippendale en 1988, incluyendo 513 especies, las ordenó en 92 series; y que Hill y Johnson en 1995 segregaron y describieron otro género adicional, *Corymbia*, y agruparon los eucaliptos en siete secciones, con series y subseries.

Brooker en el año 2000, publica una clasificación formal que incluye todos los eucaliptos conocidos hasta ese momento, reconociendo solo el género *Eucalyptus* y trece subgéneros dentro de este, dos de los cuales son *Corymbia* y *Angophora*, y ubica a todos los eucaliptos en un sistema jerárquico que considera subgéneros, secciones, subsecciones, series, subseries y supraespecies, basándose en morfología comparativa (Slee *et al.*, 2006).

Brooker *et al.* (2002) indican que la primera clasificación comprehensiva es la de Blakely en 1934, incluyendo 606 especies y variedades y basada en trabajos anteriores de von Mueller y Maiden, y que esta clasificación permaneció en uso por los taxonomistas hasta que la nueva, aunque informal, clasificación de Pryor y Johnson es publicada en 1971. En esta última, el género es dividido en siete subgéneros y representa un importante avance respecto de la de Blakely, pero su carácter informal impidió su aplicación en la literatura botánica formal.

² Capitán James Cook, navegante, cartógrafo y explorador británico.

El Herbario Nacional de Australia mantiene una aproximación conservadora, considera los géneros *Angophora* y *Eucalyptus*, y las alrededor de 800 especies del segundo las mantiene divididas en 13 subgéneros, dos de los cuales son *Blakella* y *Corymbia*, que constituyen el género *Corymbia* propuesto por Hill y Johnson en 1995.

Existen entonces 13 subgéneros, seis de los cuales consisten de una sola especie, y los restantes de numerosas especies (Brooker *et al.*, 2002). Los desacuerdos persisten en torno al reconocimiento de los géneros *Angophora*, *Blakella* y *Corymbia*. La nueva clasificación formal de Brooker en 2000, reconoce un género, *Eucalyptus*, y considera 13 subgéneros, entre los cuales están incluidos los tres antes mencionados.

Potts *et al.* (2011) indican que la última clasificación formal es la de Brooker en 2000, que reconoce más de 700 especies pertenecientes a 13 linajes evolutivos, agregan que Slee *et al.* en 2006 listan 894 *taxa*, y ofrecen un resumen comparativo entre la clasificación de Pryor y Johnson de 1971, informal pero ampliamente empleada por 30 años, y la de Brooker en 2000, indicando número de especies y entregando además ejemplos de especies de importancia forestal en los principales subgéneros de Brooker. FAO (1981), por su parte, señala los géneros, subgéneros, secciones y número de especies según la clasificación de Pryor y Johnson de 1971.

Empleando ambas fuentes, Potts *et al.* (2011) y FAO (1981), se obtiene la comparación resumida en el Cuadro N° 1. De acuerdo con la clasificación de Brooker hay un género único, *Eucalyptus*, en el cual están comprendidos como subgéneros *Angophora*, *Blakella* y *Corymbia*.



Cuadro N° 1
CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA DE LOS EUCALYPTOS

Pryor & Johnson 1971				Brooker 2000			
Género	Subgénero	Sección	Especies (N°)	Subgénero	Especies (N°)	Ejemplos de Especies	
Angophora			7	Angophora	7		
Eucalyptus	Blakella	Lemuria	10	Blakella	15		
	Corymbia	Rufaria	30	Corymbia	67	E. torelliana, E. citridora, E. variegata, E. maculata	
		Ochraria	9				
	Eudesmia	Quadraria	12	Eudesmia	19		
		Apicaria	5				
	Gaubaea	Curtisaria	2	Acerosa	1	E. cloeziana	
	Idiogenes	Gymplaria	1	Cuboidea	1		
				Idiogenes	1	E. cloeziana	
	Monocalyptus	Renantheria	106	Primitiva	1		
				Eucalyptus	110	E. regnans, E. delegatensis, E. obliqua, E. marginata, E. fastigata	
Eucalyptus	Symphyomyrtus	Equatoria	3	Cruciformes	1	E. guilfoylei	
		Tingleria	1	Alveolata	1	E. microcorys	
		Transversaria	17	Symphyomyrtus	474	E. camaldulensis, E. dunnii, E. excerta, E. globulus, E. grandis, E. nitens, E. paniculata, E. pellita, E. robusta, E. saligna, E. tereticornis, E. urophylla, E. viminalis	
		Bisectaria	104				
		Dumaria	36				
		Exsertaria	36				
		Maidenaria					68
		Umbrawarria	1				
		Howittaria	1				
	Adnataria	79					
	Sebaria	1					
Telocalyptus			Minutifructus	4	E. deglupta		

522

702

(Fuente: FAO, 1981)

(Fuente: Modificado de Potts et al., 2011)

(Fuente: FAO, 1981)

(Fuente: Modificado de Potts et al., 2011)

Potts et al. (2011) comentan (citando a Whittock, 2003) que recientes estudios moleculares sugieren que las especies del subgénero *Minutifructus* de Brooker corresponderían al subgénero *Symphyomyrtus*.

Potts et al. (2011) no incluyen las secciones de la clasificación de Brooker, pero comentan que las principales especies empleadas en plantaciones forestales, principalmente fuera de Australia, corresponden a:

Subgénero: *Symphyomyrtus*

Sección: *Maidenaria* Ej. *Eucalyptus dunnii*, *E. globulus* y *E. nitens*

Exsertaria Ej. *Eucalyptus camaldulensis* y *E. tereticornis*

Latoangulatae Ej. *Eucalyptus grandis*, *E. pellita*, *E. saligna*, y *E. urophylla*

Slee *et al.* (2006) comentan que el permanente estudio de la taxonomía de este gran grupo de especies, con técnicas en constante avance, como las moleculares y las de filogenética, muy probablemente continuará generando nuevas proposiciones y eventuales cambios en la taxonomía de los eucaliptos.

Estos autores indican también que la actual situación de la taxonomía y nomenclatura de los eucaliptos es semejante a la de muchos grandes grupos de plantas de importancia económica y ambiental, y que siempre se producirán conflictos entre clasificaciones basadas en la filogenética y aquellas aproximaciones más pragmáticas que buscan mantener una estabilidad en la nomenclatura.

Slee (2012 comunicación personal³) comenta que en la 3ª Edición de EUCLID *Eucalypts of Australia* (Slee *et al.*, 2006) decidieron seguir la clasificación de Brooker del año 2000 para la mayoría de las especies y todos los subgéneros, excepto *Corymbia* (incluido *Blakella*) y *Angophora* que se continúan usando como géneros separados, el primero con 99 *taxa* y el segundo con 16 *taxa*. Slee indica que se trató de una decisión pragmática, pensando en los usuarios; los profesionales que emplean nombres botánicos formales en manejo y silvicultura, al igual que los botánicos y estudiantes en los herbarios.

Slee señala también que estiman que esta última versión de EUCLID refleja los más ampliamente aceptados conceptos de clasificación en la actualidad y comenta que, adicionalmente, Australia tiene un cuerpo profesional, el *Council of Heads of Australasian Herbaria* (CHAH), que ha producido el documento en línea *Australian Plant Census* (APC⁴), aún sin terminar, pero bastante completo para eucaliptos.

En este documento en línea se usan los tres géneros; *Angophora*, *Corymbia* y *Eucalyptus* y el CHAH busca así proveer una lista de consenso de la flora australiana, como un punto central de referencia independiente de los permanentes desacuerdos entre los botánicos. El listado de APC no corresponde exactamente al de EUCLID, pero ambos están muy cercanos.

Se concluye entonces que la clasificación de Brookers del año 2000 es la más reciente clasificación formal de los eucaliptos y que la interpretación actualmente más aceptada y en uso es esta, pero conservando *Angophora* y *Corymbia* como géneros separados (Slee *et al.*, 2006; Slee, 2012 comunicación personal).

En consecuencia el gran grupo de plantas de los eucaliptos estaría hoy conformado por los géneros *Angophora*, *Corymbia* y *Eucalyptus*.

HÁBITO DE CRECIMIENTO

De acuerdo con su hábito de crecimiento, en Australia se les denomina árbol, malle o arbusto, aunque no hay límites muy claros entre estas categorías.

Entre los árboles se incluyen dos categorías especiales de uso común en Western

3 Andrew Slee. Australian National Herbarium. CSIRO Plant Industry, Canberra, Australia. andrew.slee@csiro.au

4 <http://www.anbg.gov.au/chah/apc/>

Australia; mallet y marlock, válidas solo para las especies de esa parte del país.

- **Árbol:** Planta leñosa de tronco recto y único, con variadas formas de copa. La definición no menciona una altura mínima, pero se refiere principalmente a los grandes eucaliptos con fuste único bien definido.

Mallet: Árbol con un tronco delgado y con las ramas fuertemente anguladas en este.

Marlock: Arbusto o pequeño árbol de tronco único, con ramas extendidas y densamente cubiertas de hojas, a menudo hasta el suelo.

Para alturas de unos 8 m y más la diferencia entre mallet y marlock se hace muy difusa.

- **Malle:** Planta leñosa con múltiples troncos desde el suelo y raras veces de más de 10 m de altura.
- **Arbusto:** En eucaliptos, los arbustos son plantas leñosas de bajo crecimiento que, aún siendo ya reproductivamente maduras, pueden tener hasta menos de 1 m de altura. Normalmente se encuentran en condiciones ambientales extremas.



Figura N° 2
HÁBITO CRECIMIENTO
ARBUSTO (IZQ), MALLE (CENTRO), ÁRBOL (DER)

PLANTACIONES FORESTALES EN EL MUNDO

Las plantaciones forestales en el mundo, de acuerdo a FAO (2010), alcanzan a 264 millones de hectáreas, lo que representa alrededor del 7% de la cubierta forestal global, y su distribución geográfica está fuertemente concentrada en Asia, con el 46% de la superficie plantada, 123 millones de hectáreas.

Le siguen Europa y Norte y Centro América con 26 y 15%, respectivamente, y África,

Sur América y Oceanía con una participación menor en las plantaciones mundiales (Cuadro N° 2 y Figura N° 3).

Cuadro N° 2
SUPERFICIE PLANTACIONES FORESTALES
POR REGIÓN

REGIÓN	SUPERFICIE (MM ha)
África	15,4
Asia	122,8
Europa	69,3
N y C América	38,7
Oceanía	4,1
S América	13,8
Total	264,1

(Fuente: FAO, 2010)

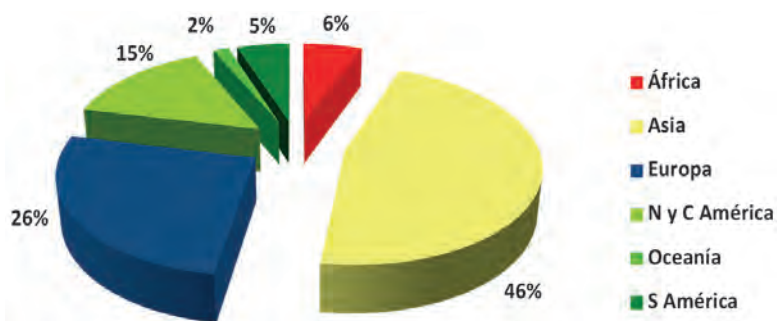


Figura N° 3
DISTRIBUCIÓN DE LAS PLANTACIONES FORESTALES

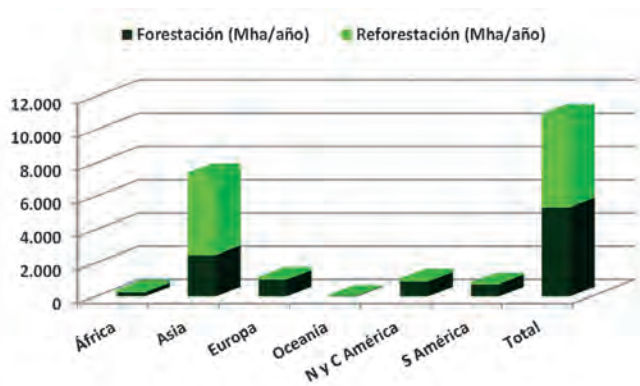


Figura N° 4
PLANTACIÓN ANUAL POR REGIÓN
2000 – 2010

Cuadro N° 3
TASA GLOBAL DE PLANTACIÓN ANUAL
2000-2010

Región	Reforestación	Forestación	Total
	(Mha / año)		
África	237	160	397
Asia	2.479	4.926	7.405
Europa	993	170	1.163
Oceanía	37	59	96
N y C América	876	204	1.080
Sudamérica	723	104	827
Total	5.345	5.623	10.968

(Fuente: FAO, 2010)

Globalmente se está plantando a una tasa anual de 11 millones de hectáreas, Asia lo hace a razón de 7,4 millones de hectáreas por año, Europa y Norte y Centro América a razón 1,2 y 1,1 millones de hectáreas anuales, respectivamente, y Sudamérica 0,83 millones de hectáreas por año, mostrando África y Oceanía participaciones bastante menores (Cuadro N° 3 y Figura N° 4) (FAO, 2010). De los 11 millones de hectáreas de plantación anual, 5,6 corresponden a forestación y 5,4 a reforestación⁵, y en ambos casos alrededor de un tercio de la superficie plantada corresponde especies exóticas o introducidas⁶ (FAO, 2010)⁷

La superficie global de plantaciones forestales, o bosques plantados como también se las denomina, durante las últimas dos décadas se ha incrementado en más de 80 millones de hectáreas (Figura N° 5) y estos bosques, si bien representan solo el 7% de la cubierta forestal mundial, están ya supliendo más del 20% del volumen total de trozas con fines industriales que anualmente se extrae para la producción de fibra, madera aserrada y otros *commodities* que actualmente se tratan en crecientes volúmenes en los mercados mundiales (FAO, 2000; FAO, 2010).

5 Se considera plantación forestal a una plantación o siembra deliberada, si esta se realiza en áreas que no tenían bosque es forestación y en áreas que lo tenían, y ya no lo tienen debido a incendio, cosecha a tala rasa u otra razón, reforestación.

6 Especie exótica o introducida es aquella que se está empleando fuera de su región o regiones de distribución natural. Ej. *Eucalyptus globulus* es especie exótica en cualquier región fuera de Australia.

7 FAO desarrolla periódicamente la Evaluación de los Recursos Forestales (FRA por su sigla en inglés), estudio en el cual se revisa y evalúa la cubierta forestal mundial, que incluye bosques nativos y plantaciones forestales. FRA 2010 determinó que la deforestación (cambio de uso a agricultura, ganadería u otros, incendios forestales y otras causas) en el período 2000 – 2010 alcanzó a una media anual de 13 millones de hectáreas, la forestación a 5,6 y la expansión natural de bosques a 2,6 millones de hectáreas, lo que significa una pérdida neta de cubierta forestal en torno a 5 millones de hectáreas anuales. La reforestación no incide en el balance.

FAO (2000) estima que hacia mediados del presente siglo los bosques plantados estarán proveyendo tal vez más del 50% de la demanda anual de trozas con fines industriales.

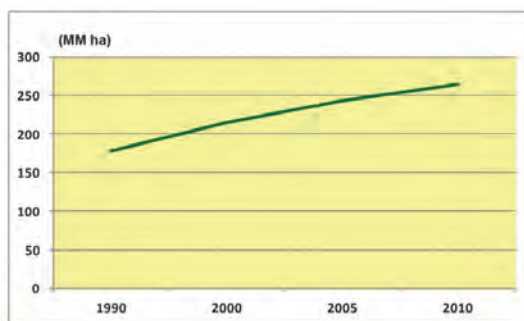


Figura N° 5
EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE GLOBAL DE BOSQUES PLANTADOS
1990 - 2010

Principales Especies en las Plantaciones Forestales

La Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales de FAO del año 2010 (FRA 2010) no entrega desagregación de superficies por especies en las plantaciones forestales, la información disponible al respecto proviene de FRA 2000 (FAO, 2000), cuando la superficie global de bosques plantados informada era de 187 millones de hectáreas.

En el año 2000, las especies o grupos de especies presentes en las plantaciones forestales corresponden en un 40 % a latifoliadas y un 31 % a coníferas, en tanto que para el 29% restante de la superficie de plantaciones no existe un registro de especies o grupo de ellas.

Entre las latifoliadas dominan *Hebea brasiliensis* (caucho), *Tectona grandis* (teca) y especies de los géneros *Eucalyptus* (eucaliptos) y *Acacia* (acacias), en tanto que entre las coníferas destacan ampliamente las especies del género *Pinus* (pinos) (Cuadro N° 4 y Figura N° 6).

Cuadro N° 4
PRINCIPALES ESPECIES EN LAS PLANTACIONES FORESTALES MUNDIALES

ESPECIE	SUPERFICIE (MM ha)
<i>Acacia spp</i>	8,3
<i>Eucalyptus spp</i>	17,9
<i>Hevea brasiliensis</i>	9,9
<i>Tectona grandis</i>	5,7
<i>Pinus spp</i>	37,4
Otras latifoliadas	33,6
Otras coníferas	20,7
Sin especificar	53,6
Total	187,1

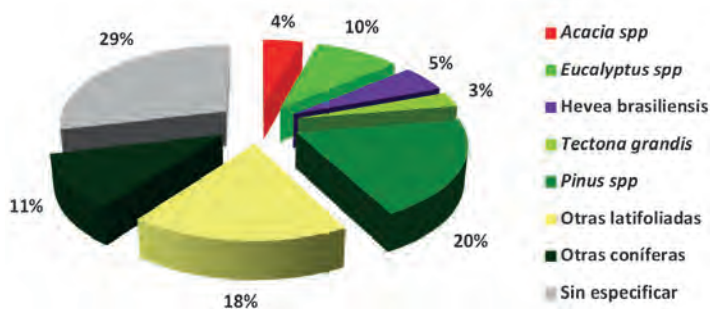


Figura N° 6
PARTICIPACIÓN DE LAS PRINCIPALES ESPECIES EN LAS PLANTACIONES FORESTALES MUNDIALES

Los productos a obtener y el valor de estos, la rapidez de crecimiento, las posibilidades de adaptación a variadas condiciones de sitio y otros factores han sido causas principales para que muchas especies sean intensamente usadas en plantaciones forestales, fuera de sus áreas de distribución natural, y es así como en estas plantaciones dominan en muchos casos especies introducidas desde otras regiones del mundo. Ejemplos de esto son el caucho, originario de la cuenca amazónica, con extensas plantaciones en Asia y África; la teca, cuya distribución natural es India, Myanmar, Laos y Tailandia, con grandes superficies plantadas en el resto de Asia y en África y América; los pinos, nativos del hemisferio norte y algunos de ellos con áreas de distribución natural bastante restringidas en este, que se han difundido ampliamente en Sur América, Oceanía y otras regiones; y los eucaliptos, originarios fundamentalmente de Australia, que se han extendido por todo el mundo, principalmente Asia, Sur América y África (Figura N° 7).

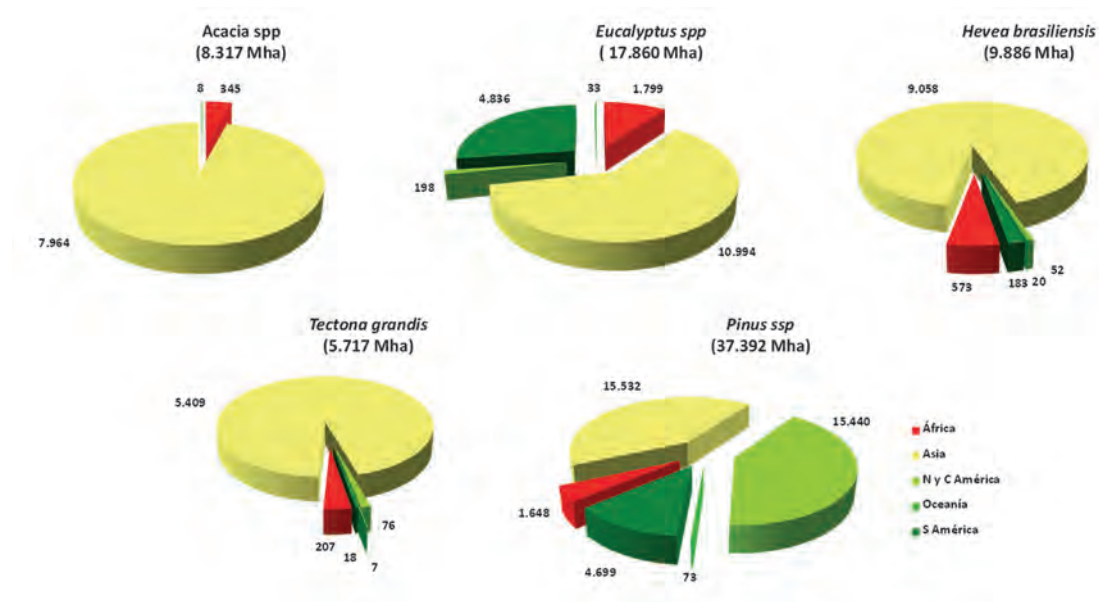
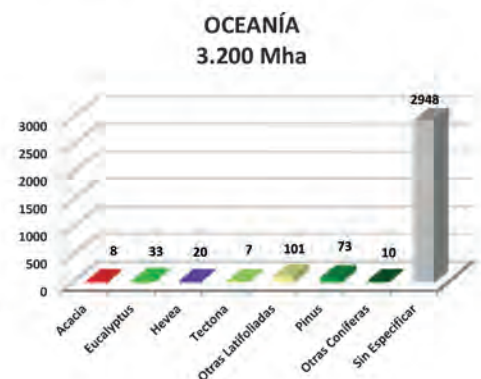
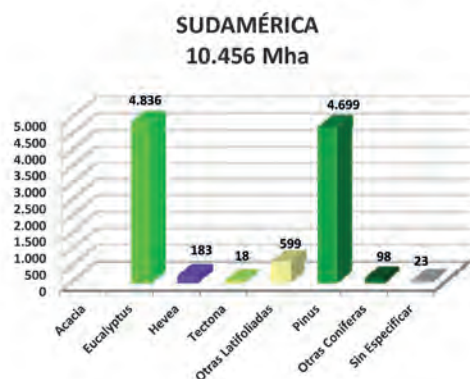
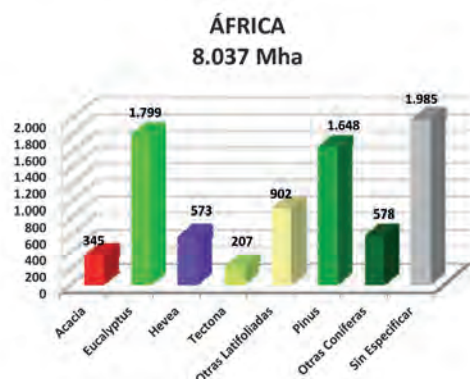
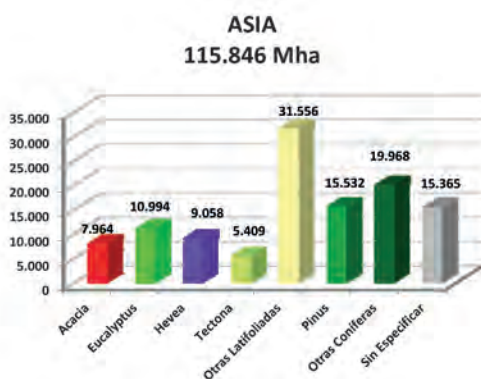
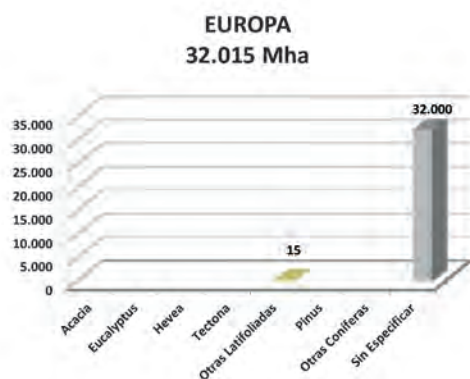


Figura N° 7
SUPERFICIE DE PLANTACIONES DE LAS PRINCIPALES ESPECIES FORESTALES SEGÚN REGIONES

Eucaliptos en las Plantaciones Forestales

FAO (2000) indica que las especies del género *Eucalyptus* se encuentran entre las más plantadas con 17,9 millones de hectáreas, superadas solo por aquellas del género *Pinus* con 37,4 millones de hectáreas (Cuadro N° 4 y Figura N° 7).

De acuerdo con las cifras indicadas, los eucaliptos predominan en las plantaciones forestales de Sur América y África; en Asia, pese a presentar casi 11 millones de hectáreas, son superados por otras latifoliadas y por pinos y otras coníferas; en Centro y Norte América y en Oceanía esta fuente no los destaca mayormente y en Europa no figuran específicamente (Figura N° 8).

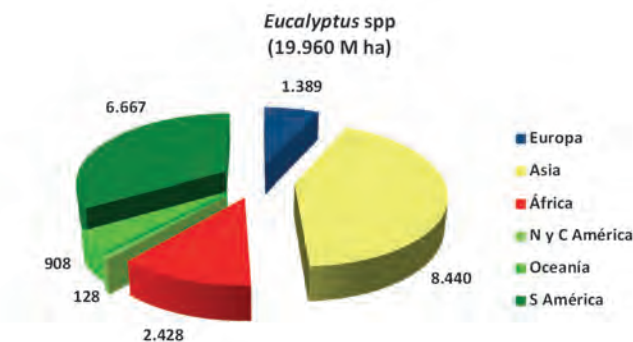


(Fuente: FAO, 2000)

Figura N° 8
PARTICIPACIÓN DE LOS EUCALIPTOS EN LAS PLANTACIONES FORESTALES
SEGÚN REGIONES

GIT (2009) emplea las cifras de FAO (2000), las complementa con consultas a organizaciones y expertos de todo el mundo para la confección de un mapa mundial de eucalipto, y concluye que la cifra global de la superficie de plantaciones de eucaliptos es significativamente mayor que la dada por FAO (2000), alcanzando a 20 millones de hectáreas al año 2009.

Los eucaliptos, según indica GIT (2009), tienen una importante participación en las plantaciones forestales en todos los continentes y, adicionalmente a lo informado por FAO (2000), aparecen importantes superficies plantadas en Europa y se incrementan aquellas de Sur América y Oceanía (Figura N° 9).

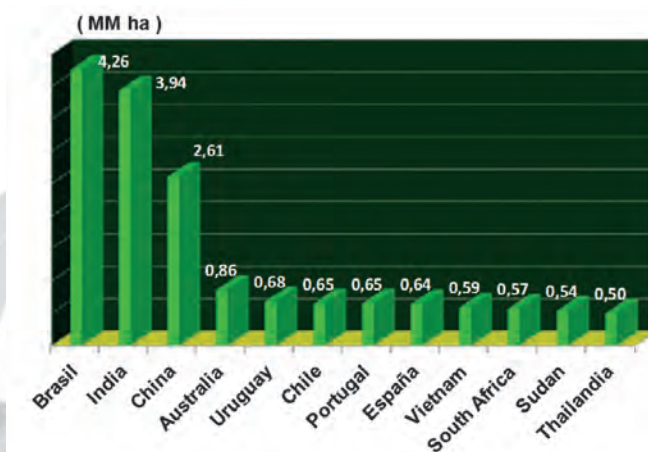


(Fuente: GIT, 2009)

Figura N° 9
PLANTACIONES DE EUCALIPTOS SEGÚN REGIONES

Asia y Sur América reúnen tres cuartas partes de las plantaciones mundiales de eucaliptos, en tanto que a nivel de países destacan Brasil con más de 4 millones de hectáreas, India con 3,9 y China con 2,6 concentrando en conjunto algo más del 50% del total.

Les siguen Australia, Uruguay, Chile, Portugal, España, Vietnam, Sudáfrica, Sudán y Tailandia, todos países con más de 500 mil hectáreas plantadas, que reúnen 5,7 millones de hectáreas y que, en conjunto con los anteriores, suman 12 países que representan el 83% de la superficie global plantada con eucaliptos (Figura N° 10). Unos 50 países, en todos los continentes, dan cuenta del 17% restante.



(Fuente: GIT, 2009)

Figura N° 10
PRINCIPALES PAÍSES CON PLANTACIONES DE EUCALIPTOS

Especies de Mayor Importancia en las Plantaciones de Eucaliptos

Harwood (2011) indica que las plantaciones de eucaliptos en el mundo se han incrementado de unos 6 millones de hectáreas existentes en 1990 a más de 20 millones de hectáreas en la actualidad y, sobre la base de visitas a los principales países que las tienen, estima que 9 especies principales y varios híbridos entre estas explican más del 90% de la superficie global de bosques plantados de eucaliptos y señala las siguientes:

Eucalyptus camaldulensis
Eucalyptus dunnii
Eucalyptus globulus
Eucalyptus grandis
Eucalyptus nitens

Eucalyptus pellita
Eucalyptus saligna
Eucalyptus tereticornis
Eucalyptus urophylla

Gran parte de las plantaciones de eucaliptos se ubican en climas tropicales, subtropicales y templados cálidos, solo *Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus* y *E. nitens* prosperan en climas templados fríos y solo estas, de entre las nueve, son plantadas en latitudes más allá de 35° S y N.

Eucalyptus dunnii y *E. pellita* en tanto han tomado importancia solo en los últimos 20 años, la primera se está usando en climas templados cálidos con precipitaciones estivales en Sudamérica, sur de África y China, y la segunda, apropiada para climas tropicales, está siendo empleada comercialmente en Indonesia. Más recientemente, ha adquirido importancia *Eucalyptus benthamii* para producción de pulpa en Latinoamérica, en países como Uruguay, por su rápido crecimiento y tolerancia a frío (Harwood, 2011).

Con la excepción de *Eucalyptus dunnii* y *E. nitens*, difíciles de propagar vegetativamente, para las especies principales se ha desarrollado exitosamente la silvicultura clonal con híbridos entre ellas que se adaptan bien a condiciones climáticas intermedias entre aquellas de las especies puras. Algunos ejemplos son (Harwood, 2011):

Híbridos *E. urophylla* x *E. grandis* se han adaptado bien a condiciones de climas tropicales y subtropicales húmedos, con mayor vigor y resistencia a enfermedades que las especies puras, y hoy se los usa masivamente en Brasil.

Híbridos *E. grandis* x *E. nitens* son comercialmente plantados en Sudáfrica en zonas altas donde el frío limita las posibilidades de *E. grandis*.

Híbridos *E. grandis* x *E. camaldulensis* muestran mejor tolerancia a sequía que *E. grandis* y mayor crecimiento que *E. camaldulensis* en sitios en Sudáfrica y Latinoamérica con precipitaciones muy bajas para *E. grandis*.

Bush (2011) menciona las 9 especies principales indicadas por Harwood (2011) (*the big nine*) que representarían el 95% de las plantaciones de eucaliptos en el mundo, pero destaca cuatro (*the very big four*) que darían cuenta de alrededor del 85% de estas y son las siguientes:

Eucalyptus camaldulensis
Eucalyptus globulus
Eucalyptus grandis
Eucalyptus urophylla

Bush (2011) deja las 5 restantes (*the quite big five*) como constituyentes de menos del 10% de las plantaciones globales:

Eucalyptus dunnii
Eucalyptus nitens
Eucalyptus pellita

Eucalyptus saligna
Eucalyptus tereticornis

Borralho (2011) indica que a principios del siglo XX se consideraba como principales especies en las plantaciones de eucaliptos a más de 100, que en los años 70 se hablaba de unas 30, número que en los años 90 se reducía a 13 y que, en la realidad actual, las especies de mayor importancia son 6 a 9, más un reducido número de otras especies de las que existen superficies significativas, pero que están perdiendo importancia. Este autor no considera *Eucalyptus saligna*, pero incorpora entre las 9 principales a *Eucalyptus smithii*.

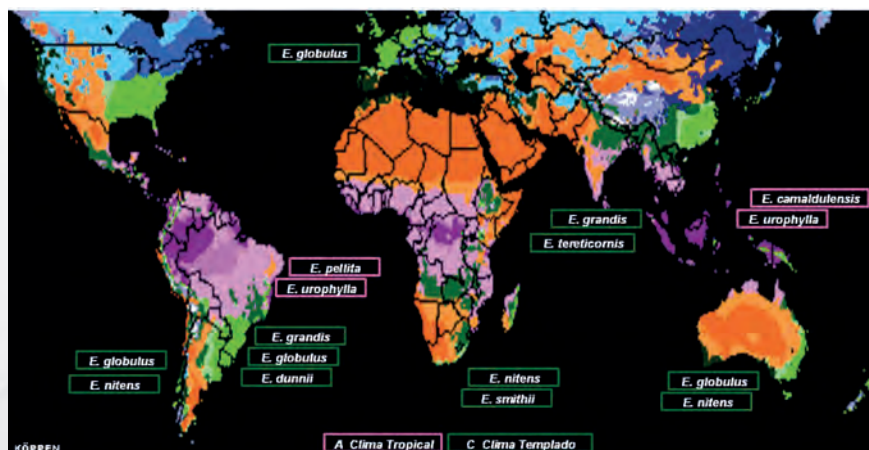
Para climas tropicales:

Eucalyptus camaldulensis
Eucalyptus urophylla
Eucalyptus pellita

Para climas templados:

Eucalyptus globulus
Eucalyptus grandis
Eucalyptus dunnii
Eucalyptus nitens
Eucalyptus tereticornis
Eucalyptus smithii

El autor mencionado ubica estas especies geográficamente y de acuerdo a tipos climáticos (A y C de Köppen) como se aprecia en la Figura N° 11.



(Fuente: Borralho, 2011)

Figura N° 11

ESPECIES DE MAYOR IMPORTANCIA EN LAS PLANTACIONES DE EUCALIPTOS

Bush (2011) comenta que todas estas especies son del subgénero *Symphyomyrtus*, se caracterizan por una buena adaptabilidad a un amplio rango de sitios y un rápido crecimiento inicial, con buenos incrementos medios anuales en rotaciones cortas, aunque pueden ser susceptibles a plagas y enfermedades. Menciona también especies del subgénero *Eucalyptus* (*Monocalyptus* según Pryor y Johnson), como *Eucalyptus regnans*, *E. delegatensis* y *E.*

obliqua, que son más sitio específicas, requieren de mejores sitios, tienen un crecimiento temprano más lento, pero pueden tener incrementos medios anuales mayores a rotaciones más largas, y en promedio su resistencia a plagas y enfermedades puede ser mejor.

Estas especies, principalmente *Eucalyptus regnans* y *E. delegatensis*, fueron de mucha importancia en plantaciones en el sur de Australia, pero la tendencia creciente a las plantaciones de corta rotación para producción de pulpa y los rápidos crecimientos iniciales de especies como *Eucalyptus globulus* y *E. nitens*, las desplazaron progresivamente, aunque actualmente están retomando importancia para plantaciones de mayor rotación y productos de madera sólida de mayor valor (Harwood, 2011).

Bush (2011) indica que entre las razones por las que las nueve especies principales han adquirido la importancia que hoy tienen están la creciente demanda por madera y *commodities* derivados de estas, aparejada con el aumento de la población mundial; sus altas tasas de crecimiento en especial en zonas tropicales; la facilidad de propagación vegetativa de la mayoría de ellas; su buena aptitud pulpable (en especial *Eucalyptus globulus*); la gran disponibilidad de sitios con relativamente buenos suelos y adecuadas precipitaciones que había hace 20 años y ausencia de heladas en zonas tropicales y subtropicales; y la presión por conservar y proteger los bosques nativos.

El mismo autor comenta igualmente que hay muy buenas razones por las que se puede requerir emplear más especies de eucaliptos en las plantaciones y entre estas se cuentan:

- La relativa menor disponibilidad de los mejores sitios en muchos lugares o regiones.
- La presencia de factores de sitio limitantes para que prosperen las principales especies (frío, sequías) en diferentes áreas.
- La necesidad de mayor resistencia a plagas y enfermedades.
- La existencia de nichos de mercado para productos de mayor valor (madera aserrada, chapas).
- La prevención de modificaciones de sitios como producto del cambio climático.
- El aumento de plantaciones con fines de servicios ambientales como la captura de carbono o de producción de bioenergía.

La identificación de las numerosas especies de este género de tan amplia distribución natural no es sencilla, múltiples publicaciones existen al respecto y se emplean para la clasificación taxonómica diferentes componentes del árbol, como corteza, hojas juveniles y adultas, flores, frutos y semillas, y más detalladamente, distribución, cantidad y morfología de flores y frutos, como los estambres, las anteras, los opérculos que cubren las yemas florales antes de liberar los estambres y otras características, todas las cuales muestran también una gran variedad a través de las diferentes especies.

En la Figura N° 12 se muestra la división administrativa de Australia y sus principales tipos climáticos y en las Figuras N° 13 a N° 21 se caracteriza a las principales especies, indicando su distribución natural, hábito de crecimiento, corteza, frutos y flores.

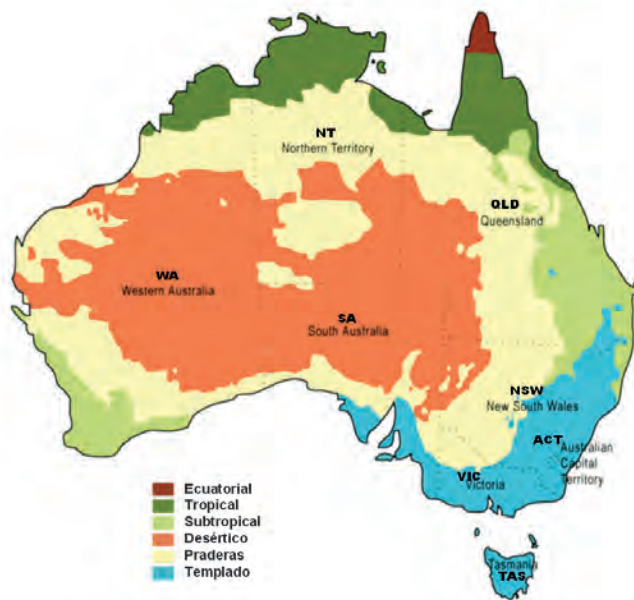


Figura N° 12
ESTADOS DE AUSTRALIA Y TIPOS CLIMÁTICOS



Eucalyptus camaldulensis

- *Eucalyptus camaldulensis* var *camaldulensis*
- *Eucalyptus camaldulensis* var *obtusa*
- *Eucalyptus camaldulensis* var *acuminata*



***Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. River Red Gum**

Es la especie de más amplia distribución en Australia, está presente en todos los Estados, excepto Tasmania. Es una especie principalmente ribereña de cursos de agua permanentes u ocasionales. Tamaño variable, corteza blanca, crema o gris, lisa, con parches café, amarillos o rosados. Frutos pedicelados agrupados de a siete. Flores blancas. Se reconocen tres variedades.

Se la usa en construcción, durmientes, pisos, tableros, terciados y chapas, postes, leña y carbón, aceites, gomas, miel, medicinas y como ornamental.

- *Eucalyptus camaldulensis* var *camaldulensis*

Árbol de hasta 45 m de altura, es la variedad más abundante, característica del SE de SA, VIC, NSW y S de QLD.

- *Eucalyptus camaldulensis* var *obtusa*

Árbol de hasta 30 m de altura, presente en el SE de NSW, NE de SA, QLD, NT y N y O de WA.

- *Eucalyptus camaldulensis* var *acuminata*

Árbol de hasta 25 m de altura, distribución más restringida; S de QLD y N de NSW.

(Fuente: Brooker *et al.*, 2000)

Figura N° 13
Eucalyptus camaldulensis



Eucalyptus globulus

- *Eucalyptus globulus* ssp *globulus*
- *Eucalyptus globulus* ssp *bicostata*
- *Eucalyptus globulus* ssp *maidenii*
- *Eucalyptus globulus* ssp *pseudoglobulus*



Eucalyptus globulus Labill. **Blue Gum**

Especie forestal de amplia distribución en los Estados de TAS, VIC y NSW. Característica por sus hojas juveniles azul plateadas, sus vigorosos retoños y sus tallos juveniles de sección cuadrada. La corteza es lisa y blanca y, excepto en la base donde es persistente, se desprende en largas tiras. Flores blancas. Son árboles de gran tamaño. Se reconocen cuatro subespecies.

Se la usa en construcciones, pulpa, durmientes, gomas, aceites, miel, medicinas y como ornamental.

- *Eucalyptus globulus* ssp *globulus* **Tasmanian Blue Gum**

Árbol de hasta 70 m de altura, abundante en tierras bajas de TAS y centro sur de VIC. Presenta frutos sésiles normalmente aislados.

- *Eucalyptus globulus* ssp *bicostata* **Victorian Blue Gum**

Árbol de hasta 45 m de altura, presente en zonas altas de VIC y S de NSW y en una reducida población en SA. Presenta frutos sésiles agrupados de a tres.

- *Eucalyptus globulus* ssp *maidenii* **Maiden's Gum**

Árbol de hasta 50 m de altura, ocurre en el SE de NSW y E de VIC. Presenta frutos pedicelados agrupados de a siete.

- *Eucalyptus globulus* ssp *pseudoglobulus* **Victorian Eurabbie**

Árbol de hasta 45 m de altura, presente en zonas costeras e interiores de VIC. Presenta frutos sésiles, pedicelados, agrupados de a tres.

(Fuente: Brooker *et al.*, 2000)

Figura N° 14
Eucalyptus globulus



Eucalyptus grandis



***Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden Rose Gum**

Especie forestal que se encuentra en bosques húmedos del E de Australia, desde el N de NSW hasta el N de QLD.

Árbol de hasta 75 m de altura, su corteza es normalmente rugosa en la base y limpia, lisa y blanca hacia arriba. Frutos sésiles o pedicelados, agrupados de a cuatro o cinco. Flores blancas.

Se la usa en construcciones, chapas, pisos, tableros, botes, gomas, miel y como ornamental.

(Fuente: Brooker *et al.*, 2000)

Figura N° 15
Eucalyptus grandis



Eucalyptus urophylla



Eucalyptus urophylla St. Blake. **Timor Mountain Gum**

Su distribución natural es fuera de Australia, se restringe a varias islas del SE Asiático, correspondientes a Indonesia y Timor (islas Flores, Adonara, Lomblen, Pantar, Alor, Wetar y Timor).

Árbol de hasta 45 m de altura, ejemplares excepcionales 55 m, corteza normalmente persistente y fibrosa, café rojiza, a veces rugosa en la base. Frutos en umbrela, de cinco a ocho. Flores blancas.

Se la usa en construcciones, pulpa, leña y carbón, puentes, pisos, postes, taninos y aceites.

(Fuente: Gunn y Mc Donald, 1992; WAC, 2012)

Figura N° 16
Eucalyptus urophylla



Eucalyptus dunnii



***Eucalyptus dunnii* Maiden. White Gum**

Especie forestal con una distribución restringida al SE de QLD.

Árbol de hasta 50 m de altura, su corteza es normalmente rugosa en la base hasta 1 a 2 m, hojas juveniles verde grisáceas y limpia, lisa y blanca hacia arriba. Frutos pedicelados, agrupados de a siete. Flores blancas.

Se la usa en construcciones ligeras y como ornamental.

(Fuente: Brooker *et al.*, 2000)

Figura N° 17
Eucalyptus dunnii



Eucalyptus nitens



***Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden Shining Gum**

Especie forestal que se ubica en zonas altas en NSW y en la parte central y S de VIC.

Árbol de hasta 70 m de altura, su corteza es normalmente lisa en la base, con partes rugosas grisáceas hasta 1 m, y lisa gris pálido o gris verdosa hacia arriba. Hojas juveniles azul grisáceas y tallos juveniles grisáceos de sección cuadrada. Frutos sésiles agrupados de a siete. Flores blancas.

Se la usa en construcciones, tableros, pulpa, pisos, muebles, miel y como ornamental.

(Fuente: Brooker *et al.*, 2000)

Figura N° 18
Eucalyptus nitens



Eucalyptus pellita



***Eucalyptus pellita* F. Muel. Red Mahogany**

Especie forestal que ocurre naturalmente en Australia, N de QLD, y en Nueva Guinea.

Árbol de hasta 40 m de altura, su corteza es rugosa café a café rojiza. Frutos axilares, sésiles a cortamente pedicelados, agrupados normalmente de a siete. Flores blancas.

Se la usa en construcciones, leña y carbón, aceites, miel, cortavientos y como ornamental.

(Fuente: Gunn *et al.*, 1992; Brooker *et al.*, 2000; WAC, 2012)

Figura N° 19
Eucalyptus pellita



Eucalyptus tereticornis

- *Eucalyptus tereticornis* ssp. *tereticornis*
- *Eucalyptus tereticornis* ssp. *mediana*



***Eucalyptus tereticornis* Smith. Red Irongum**

Especie forestal con una amplia distribución en la costa E de Australia.

Corteza lisa, moteada crema, amarillo y rosado. Frutos pedicelados, agrupados de a siete. Flores blancas.

Se reconocen dos subespecies.

Se la usa para madera, miel, gomas, productos medicinales y como ornamental.

- *Eucalyptus tereticornis* ssp. *tereticornis*

Árbol de hasta 50 m de altura. Amplia distribución en la costa E de Australia, desde el S de NSW hasta el N de QLD.

- *Eucalyptus tereticornis* ssp. *mediana*

Árbol de hasta 20 m de altura. Distribución restringida al E de VIC.

(Fuente: Brooker *et al.*, 2000)

Figura N° 20
Eucalyptus tereticornis



Eucalyptus smithii



***Eucalyptus smithii* R. Baker. Gully Gum**

Especie forestal cuya distribución natural es SE de NSW y E de VIC.

Árbol de hasta 45 m de altura, su corteza es rugosa en la base y a mayor altura lisa, blanca, verde pálido o crema pálido. Frutos pedicelados, agrupados de a siete. Flores amarillas

Se la usa en construcciones, aceites y productos medicinales.

(Fuente: Brooker *et al.*, 2000)

Figura N° 21
Eucalyptus smithii

REFERENCIAS

Borralho, Nuno, 2011. Quality – Cost Competitiveness of Eucalypts and How to Move it to the Next Level. In: IUFRO Eucalypts, Porto Seguro, Bahía, Brazil. En: <http://www.ipef.br/eventos/2011/iufro.asp>

Brooker, M. I. H.; Connors, J. R. y Slee, A. V., 2000. EUCLID Eucalypts of South Eastern Australia. Revised Edition (CD). Centre for Plant Biodiversity Research. CSIRO Publishing. Australia.

Brooker, M. I. H.; Slee, A. V. and Connors, J. R., 2002. EUCLID Eucalypts of Southern Australia. Second Edition, CSIRO Publishing. Australia. In: <http://www.anbg.gov.au/cpbr/cd-keys/Euclid/sample/html/about.htm>

Bush, David, 2011. Eucalypts for Planting: Trends in Testing and Utilization. CSIRO Plant Industry, Australian Tree Seed Centre. In: IUFRO Eucalypts, Porto Seguro, Bahía, Brazil. In: <http://www.ipef.br/eventos/2011/iufro.asp>

FAO, 1981. El Eucalipto en la Repoblación Forestal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, FAO. En: <http://www.fao.org/docrep/004/AC459S/AC459S00.htm#TOC>

FAO, 2000. FRA 2000. Forest Resources Assessment (FRA). In: <http://www.fao.org/docrep/004/y2316s/y2316s0b.htm>

FAO, 2010. FRA 2010. Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales. Estudio FAO: Montes 163. En: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>

GIT, 2009. Global *Eucalyptus* Map Version 1.0.2. GIT Forestry Consulting's. In: http://gitforestry.com/download_git_eucalyptus_map.htm

Gunn, B. V. y Mc Donald, M. W., 1992. Recolección de Semillas de *Eucalyptus urophylla*. División Forestal de CSIRO. Canberra, Australia. En: Información sobre Recursos Genéticos Forestales N° 19. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FAO. Roma. En: <http://www.fao.org/docrep/006/u5380s/U5380S00.htm#TOC>

Gunn, B. V., Gardiner, C. A. and Morse, G. J., 1992. *Eucalyptus pellita*. Seed Collections in Papua New Guinea and North Queensland, September–November 1991. CSIRO Division of Forestry, Canberra ACT, Australia. In: Forest Genetic Resources Information N° 20. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, FAO.

Harwood, C., 2011. Introductions: Doing it Right. In 'Developing a Eucalypt Resource: Learning from Australia and Elsewhere'. (Ed. J Walker) pp. 43-54. (Wood Technology Research Centre, University of Canterbury: Christchurch, New Zealand). En: <http://www.crcforestry.com.au/newsletters/downloads/Harwood-paper-NZ-Conference-2011-final.pdf>

Hickey, J. E., Kostoglou, P. and Sargison, G. J., 2000. Tasmania's Tallest Trees. Forestry Tasmania. Tasforests Vol. 12 December 2000. In: http://www.forestrytas.com.au/forestrytas/tasfor/tasforests_12/tasfor_12_09.pdf <http://aciarc.gov.au/files/node/505/pr111.pdf>

Potts, Brad; Hamilton, Matthew and Blackburn, David, 2011. Genetics of Eucalypts: Traps and Opportunities. In: Workshop in New Zealand on Developing a Eucalypt Resource" Held on 3rd & 4th Nov 2011. Learning from Australia and Elsewhere. (Ed. J. Walker). Wood Technology Research Centre, University of Canterbury, New Zealand. In: <http://www.crcforestry.com.au/view/index.aspx?id=82107>

Slee, A. V.; Brooker, M. I. H.; Duffy, S. M. and West, J. G., 2006. EUCLID Eucalypts of Australia. Third Edition. Centre for Plant Biodiversity Research (CPBR), CSIRO Plant Industry, Australia. En: <http://www.publish.csiro.au/samples/euclidsample/html/about.htm>

WAC, 2012. Agroforestry Tree Data Base. A Tree Species Reference and Selection Guide, *Eucalyptus urophylla*. World Agroforestry Centre. In: <http://www.worldagroforestry.org/sea/products/afdbases/af/asp/SpeciesInfo.asp?SpID=821>.



3. LOS EUCALIPTOS EN CHILE

Santiago Barros A.¹

RECURSOS FORESTALES

La cubierta forestal en Chile al año 2011 es de casi 16 millones de hectáreas, lo que representa el 21,5% de la superficie territorial nacional. De esta superficie boscosa, 13,3 millones de hectáreas corresponden a bosques nativos y 2,4 millones de hectáreas a plantaciones forestales (INFOR, 2012).

Los bosques nativos, como su nombre lo indica, están compuestos por especies nativas del país, y las plantaciones forestales, en casi su totalidad, por especies exóticas o introducidas.

Respecto de los límites territoriales de un país, las especies exóticas o introducidas son aquellas cuyas áreas o regiones de ocurrencia o distribución natural se encuentran fuera de los límites de este territorio y, contrariamente, las especies nativas o autóctonas son aquellas cuya ocurrencia geográfica natural se ubica dentro estos. Las especies nativas o autóctonas son además endémicas del país si ocurren en forma natural exclusivamente dentro de su territorio.

Frecuentemente se habla también de especies naturalizadas, aludiendo a especies que en algún momento fueron introducidas a una región o país y que, posteriormente, con el paso del tiempo y encontrando condiciones ambientales favorables, se han propagado naturalmente llegando a confundirse en ocasiones con las especies nativas.

Desde la antigüedad el hombre ha difundido especies fuera de sus áreas de distribución geográfica natural, en forma casual o intencional, transportando semillas que le servían de alimento a él o a su ganado, introduciendo cultivos en nuevas regiones para producir alimentos, leña, madera u otros productos, o para ser utilizadas como especies ornamentales.

Desde la llegada de los españoles (siglo XVI) los bosques nativos han sido fuertemente alterados como producto de la habilitación de suelos para uso agrícola y ganadero, práctica que se hace más intensa durante la época de la Colonia (siglos XVII y XVIII) y de la Independencia (inicios del siglo XIX en adelante) con el creciente poblamiento del territorio.

Hasta mediados del siglo XX los bosques aún eran objeto de grandes incendios para despejar terrenos para la actividad agrícola y ganadera, o explotados mediante cortas selectivas que buscaban los mejores ejemplares de las especies más valiosas (floreo).

Escasas y aisladas iniciativas se registran para revertir esta situación de destrucción y degradación de los bosques nativos, hasta que a principios del siglo XX (DL. 656 de 1925, DFL 265 de 1931 y DS 4363 de 1931) se publican las primeras normativas con este fin,

¹ Ingeniero Forestal U. de Chile. Instituto Forestal. Dirección Ejecutiva. sbarros@infor.cl

aunque de escaso efecto, dado que su componente de fomento es mínima.

Posteriormente, en 1974, se promulga un cuerpo legal de Fomento Forestal (DL 701 de 1974) que, aunque orientado principalmente a incentivar las plantaciones forestales, regula la utilización de todo tipo de bosques. Esta normativa tiene un decisivo efecto sobre el incremento de la superficie de plantaciones en el país y en el consecuente desarrollo de una fuerte industria forestal derivada de ellas. Sin embargo, no hay un efecto semejante en materia de bosques nativos al no contemplarse en la ley el fomento al manejo de estos.

Solo recientemente (Ley 20.283 de 2008), se promulga un cuerpo legal expresamente enfocado al fomento, al manejo y a la recuperación de los bosques nativos, el cual está en sus primeros años de aplicación.

Como resultado, hoy los bosques nativos distan mucho de aquellos que encontraron los españoles hace cinco siglos, su superficie se ha reducido, prácticamente no participan en la producción forestal y se encuentran fraccionados, mayoritariamente degradados y empobrecidos en su composición de especies.

Las plantaciones forestales en tanto, empleando especies exóticas de rápido crecimiento, han experimentado desde mediados del siglo pasado, y en especial desde los años 70 de aquél, una explosiva expansión acompañada de un equivalente desarrollo industrial basado en ellas. Las especies nativas, aunque consideradas en el DL 701 de 1974, prácticamente no participan en las plantaciones, dado que la mayoría de ellas tendrían períodos de rotación que duplican, triplican o más aquél de las especies exóticas de rápido crecimiento mayoritariamente empleadas, como pinos y eucaliptos.

Hasta los años 60 del siglo pasado los bosques nativos aún eran la base de la actividad forestal en el país y el principal producto era la madera aserrada, con una producción cercana a los 500 mil metros cúbicos anuales. En el año 1966 la producción de madera aserrada procedente de las plantaciones de pino radiata (*Pinus radiata*) iguala a aquella proveniente de los bosques nativos y en adelante sigue un crecimiento sostenido.

Hoy se producen unos 6,7 millones de metros cúbicos de madera aserrada y la participación de los bosques nativos es absolutamente marginal, unos 128 mil metros cúbicos (INFOR, 2012), y se suma la producción de pulpa, de más de 4 millones de toneladas, originada en su totalidad en plantaciones forestales.

Actualmente, la corta total anual de madera en trozas de los bosques para fines industriales (pulpa y papel, madera aserrada, tableros y chapas y otros productos) es de unos 39 millones de metros cúbicos y de los bosques nativos provienen solo unos 370 mil metros cúbicos, lo que representa menos del 1%. No obstante, se cortan anualmente unos 16 millones de metros cúbicos para leña, de los cuales unos 7 millones de metros cúbicos se generan en los bosques nativos (INFOR, 2012).

Como consecuencia de las deforestaciones del pasado, en la zona central y sur del país existen importantes superficies de suelos desarbolados y erosionados, susceptibles de ser plantados, cuya superficie se estima en varios millones de hectáreas, muy especialmente en las regiones australes en donde grandes incendios forestales ocurridos durante procesos de colonización en la primera mitad del siglo pasado eliminaron los bosques en extensas

superficies, los cuales no se recuperaron debido a la pérdida de suelos por erosión, a las rigurosas condiciones climáticas dominantes y a las cargas ganaderas a que se sometió a los terrenos.

Respecto de los más de 13 millones de hectáreas de bosques nativos, 4 millones de hectáreas se encuentran bajo régimen de conservación dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), en Parques Nacionales y Reservas; unos 3 millones de hectáreas corresponden a bosques de protección en pendientes fuertes y en laderas de cursos de agua o están compuestos por especies amenazadas o son el hábitat de especies amenazadas de fauna; y los 7 millones de hectáreas restantes son bosque considerados comerciales.

En cuanto a la tenencia de los recursos forestales, en Chile los bosques son fundamentalmente privados, el Estado es dueño de unos 4 millones de hectáreas de bosques nativos que están dentro del SNASPE, de alrededor de 1 millón de hectáreas más fuera de este, principalmente en zonas alejadas o insulares de limitada accesibilidad en la zona sur, y de una muy reducida superficie de plantaciones existentes en reservas forestales en distintas zonas del país.

En consecuencia, hay cerca de 9 millones de hectáreas de bosques nativos en manos privadas, muy mayoritariamente pequeños y medianos propietarios. También pertenecen a propietarios privados casi la totalidad de las plantaciones, de estas unas 800 mil hectáreas son de pequeños y medianos propietarios y 1,6 millones de hectáreas son parte del patrimonio de las grandes empresas forestales del país.

Bajo la situación descrita destacan como importantes desafíos actuales para el sector forestal chileno el incremento de las plantaciones, cuya superficie se estima podría duplicarse o más, y la recuperación, manejo e incorporación a la producción de unos 7 millones de hectáreas de bosques naturales actual o potencialmente comerciales, con todos los beneficios económicos, sociales y ambientales que estos desarrollos involucrarían.

Especial atención requieren los pequeños y medianos propietarios, que controlan gran parte de los bosques nativos privados, unas 800 mil hectáreas de plantaciones forestales y extensas superficies de suelos forestales desarbolados donde ampliar las plantaciones forestales del país.

LAS ESPECIES EXÓTICAS O INTRODUCIDAS EN CHILE

En Chile existe una gran cantidad de especies arbóreas exóticas que han sido introducidas al país desde la llegada de Diego de Almagro en 1536 hasta la actualidad. Numerosas especies latifoliadas y coníferas, ornamentales o productoras de madera o frutos, son parte del paisaje chileno en el campo y las ciudades desde hace siglos. Varias de ellas, naturalizadas, son percibidas por la sociedad como especies chilenas, ejemplo de esto son álamo (“álamo guacho”), sauce (“sauce llorón”), aramo, pino, eucalipto, nogal, castaño y otras, que son componentes del entorno rural y urbano del país, pero que fueron tempranamente introducidas a Chile desde diferentes regiones del mundo, como Europa, Norteamérica, Asia, Australia y otras.

Los Inicios

Hacia fines del siglo XIX se podría ubicar el nacimiento de la silvicultura con especies forestales introducidas en Chile, cuando ya se empieza a prestar atención a especies que pudieran permitir el establecimiento de plantaciones forestales con fines comerciales, dentro de la gran variedad de condiciones climáticas y ecológicas que caracterizan al país y en las importantes superficies desarboladas que era necesario repoblar.

Pioneros en esto son dos técnicos alemanes; Federico Albert y Conrad Peters, que desarrollaron sus trabajos principalmente en Chanco y Lota, zonas costeras de las hoy Regiones de Maule y Bio Bio, respectivamente, a fines del siglo XIX e inicios del siglo XX.

En 1889 el Gobierno de Chile contrata al naturalista alemán Federico Albert para trabajar en el Museo Nacional de Historia Natural de Santiago, quien fue el primer visionario que impulsó el desarrollo forestal en Chile. Sus ideas centrales apuntaban a la recuperación de los terrenos degradados, al impulso a las plantaciones forestales con fines comerciales y a la creación de áreas silvestres protegidas.

Albert desarrolló gran parte de sus trabajos en las dunas de Chanco, en la Región del Maule, motivado por el extenso campo de dunas costeras ahí existente, que amenazaba cubrir el pueblo del mismo nombre, además de importantes áreas de cultivo. Realizó trabajos de contención y forestación de dunas que fueron pioneros y salvaron a este pueblo de ser cubierto por el incesante avance de las dunas.

Albert (1909) publica Los 7 Árboles Forestales más Recomendables para el País. Las especies que destaca son todas exóticas, con la excepción de pimienta (*Schinus molle*), y todas ellas son conocidas actualmente, presentes en los campos en pequeños bosquetes o en alamedas y en plazas y parques como ornamentales.

Albert señala 7 especies principales para terrenos de secano y varias otras adicionales para zonas al norte o al sur de la que fue su zona de estudio, y distinguiendo también para terrenos regados.

Actualmente se cultivan en el país más de 2000 variedades de árboles pertenecientes a más de 500 especies. Todas estas son de utilidad relativa i crecen en las más diversas condiciones de clima i suelo". Habiendo cultivado en la sección de Aguas i Bosques, con el objeto de ensayar, un gran número de especies forestales, hemos creído llegado el momento de establecer el verdadero valor que cada una de ellas tiene a fin de hacer extensivo i recomendable el cultivo de todos aquellos árboles cuyos productos i condiciones de desarrollo son convenientes i por el contrario, limitar la multiplicación de los que por las condiciones climáticas de nuestro territorio tienen un crecimiento raquítico i tardío.

La finiquitada Sección de Ensayos Zoológicos i Botánicos ya redujo el número de especies útiles a 168 i la Cartilla Forestal de la Sección de Aguas i Bosques las limitó a 36 recomendables i unas 20 por ensayar. Hoy día estamos en condiciones de llenar las necesidades del país con sólo 7 especies en cada una de las grandes divisiones climáticas i culturales. Es eso un gran paso dado adelante en la silvicultura del país, del cual debemos esperar los resultados más benéficos en el futuro. Podemos recomendar los 7 árboles principales en jeneral (Albert, 1909).

LOS 7 ÁRBOLES FORESTALES MÁS RECOMENDABLES PARA EL PAÍS		
HACIA EL NORTE		HACIA EL SUR
TERRENOS DE SECANO		
<i>Cupressus sempervirens</i>	<i>Eucalyptus resinifera</i>	<i>Picea excelsa</i>
<i>Pinus pinea</i>	<i>Cupressus torulosa</i>	<i>Thuja plicata</i>
<i>Schinus molle</i>	<i>Pinus canariensis</i>	<i>Pseudotsuga taxifolia</i>
	<i>Pinus insignis</i>	<i>Pinus excelsa</i>
	<i>Pinus maritima</i>	<i>Pinus sylvestris</i>
	<i>Acacia melanoxylon</i>	<i>Fraxinus excelsior</i>
	<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Abies pectinata</i>
TERRENOS REGADOS		
	<i>Eucalyptus diversicolor</i>	<i>Eucalyptus resinifera</i>
	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus viminalis</i>
	<i>Cupressus macrocarpa</i>	
	<i>Pinus canariensis</i>	
	<i>Acacia melanoxylon</i>	
	<i>Sequoia sempervirens</i>	
	<i>Quercus pedunculata</i>	

Varias de estas especies han sido posteriormente redescritas por los botánicos y se les ha cambiado sus nombres científicos, así *Pinus insignis* es hoy pino radiata (*Pinus radiata*), *Pseudotsuga taxifolia* es conocido ahora como pino Oregón o Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*), *Quercus pedunculata* es hoy roble común en Europa (*Quercus robur*), *Pinus maritima* es hoy pino marítimo (*Pinus pinaster*) y *Pinus excelsa* es ahora pino del Himalaya o pino llorón (*Pinus wallichiana*).

De las especies seleccionadas por Albert hace más de 100 años, solo una pocas tienen hoy importancia forestal, pero entre ellas ya están *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, especies que son la base de las plantaciones forestales actuales de la zona centro-sur del país.

Se suman pino oregón (*Pseudotsuga menziesii*), especie importante en las plantaciones de la zona sur y austral, y pino piñonero (*Pinus pinea*), aroma australiano (*Acacia melanoxylon*) y acacia falsa (*Robinia pseudoacacia*), especies con una incipiente participación actual en plantaciones en diferentes regiones del país.

La información disponible indica que Albert probó unas 165 especies y entre estas 28 del género *Eucalyptus*. Sin embargo, de estas últimas seleccionó solo *Eucalyptus resinifera* y, secundariamente, *Eucalyptus diversicolor*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus viminalis*.

<i>Eucalyptus amygdalina</i>	<i>Eucalyptus ficifolia</i>	<i>Eucalyptus marginata</i>	<i>Eucalyptus resinifera</i>
<i>Eucalyptus anderwsi</i>	<i>Eucalyptus feocunda</i>	<i>Eucalyptus microcorys</i>	<i>Eucalyptus robusta</i>
<i>Eucalyptus coriacea</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus muelleri</i>	<i>Eucalyptus rostrata</i>
<i>Eucalyptus corynocalyx</i>	<i>Eucalyptus gomphocephala</i>	<i>Eucalyptus obliqua</i>	<i>Eucalyptus salmonophloia</i>
<i>Eucalyptus diversicolor</i>	<i>Eucalyptus gunnii</i>	<i>Eucalyptus paniculata</i>	<i>Eucalyptus siderophloia</i>
<i>Eucalyptus erythronema</i>	<i>Eucalyptus longifolia</i>	<i>Eucalyptus polianthema</i>	<i>Eucalyptus tereticornis</i>
<i>Eucalyptus eugenoides</i>	<i>Eucalyptus maculata</i>	<i>Eucalyptus populifolia</i>	<i>Eucalyptus viminalis</i>

Una Misión Forestal de FAO visitó los campos de dunas de Chanco a mitad del siglo pasado (Pilla, 1952) y en su informe destaca que hay resultados positivos con arbóreas

exóticas, un gran efecto colonizador de algunas leguminosas y que se han forestado cerca de 500 ha en las dunas fiscales, trabajos que fueron iniciados hace unos 50 años por Federico Albert, entonces jefe del Servicio Forestal de Chile.

Árbóreas exóticas con resultados positivos		Gran efecto colonizador
<i>Pinus insignis</i>	<i>Acacia melanoxylon</i>	<i>Genista hispanica</i>
<i>Eucalyptus sp.</i>	<i>Acacia dealbata</i>	<i>Cytisus sp.</i>
<i>Cupressus macrocarpa</i>	<i>Pinus pinea</i>	<i>Acacia armata</i>
<i>Cupressus torulosa</i>	<i>Myoporus sp.</i>	
<i>Pinus maritima</i>		

Por su parte, desde mediados del siglo XVIII, los fundadores de la Industria Carbonífera de Lota, la familia Cousiño, compraron importantes extensiones de terrenos en la zona costera de Arauco, con el objeto de obtener la madera necesaria para revestir las galerías subterráneas de las minas que se extendían hasta bajo el mar.

A medida que avanzaban las galerías de las minas el consumo de madera hacía que los bosques explotables fueran cada día más lejanos y no existía en la época mayor cuidado por la renovación de los bosques naturales explotados y esta frecuentemente se perdía en grandes incendios.

Esta situación estaba comprometiendo seriamente los niveles de producción de la industria y condujo a que se contratara a un técnico europeo que pudiera cuidar y hacer crecer los bosques. Este técnico resultó ser el alemán Konrad Peters. Bay-Schmith (1965) hace algunas observaciones sobre ensayos de especies forestales en la Provincia de Arauco.

La obra de Peters en el campo de los ensayos forestales es muy importante, su trabajo fue extremadamente difícil por la escasa información sobre especies y las grandes dificultades para obtener semillas conocidas y en buen estado. Después de unos cuantos fracasos obtuvo éxito con Eucalyptus globulus, que desde ese momento fue la especie más ampliamente plantada en la zona y resolvió la crisis de abastecimiento de madera de la industria del carbón. Entre los años 1902 y 1920 hizo plantar unas 800 ha de Pinus insignis, pensando que su madera serviría para las minas igual que el eucalipto, sin embargo, cuando las primeras plantaciones empezaron a producir madera, se apreció que esta no tenía suficiente resistencia para ser empleada en las minas y además no "avisaba"². Esto fue considerado como un fracaso y durante los siguientes 15 años no se plantó pino.

No existe así una absoluta claridad sobre cuándo fueron introducidas al país las especies *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* y sobre quién las introdujo. Se trata de especies de reducidas áreas de distribución natural y que eran de limitada importancia en sus lugares de origen, por lo que es probable que su introducción haya sido más bien accidental, pero que ahora en diferentes zonas de Chile se desarrollan mejor que en sus áreas de ocurrencia natural en sus regiones de origen (Norteamérica y Australia, respectivamente).

Sin embargo, todo indica que estas afortunadas y tempranas introducciones serían

² Las maderas duras como algunas nativas y eucalipto crujen antes de colapsar, lo que permitía a los mineros escapar de las galerías oportunamente antes que se derrumbaran.

atribuibles a Federico Albert, a Konrad Peters, o a ambos alemanes de destacada participación en la historia del sector forestal chileno, y que se habría producido a fines del siglo XIX. Estas introducciones corresponderían más probablemente a Albert, que habría iniciado sus trabajos algo antes que Peters.

Bay-Schmith (1965) señala que a partir de 1950, ya extendidas las plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* y cubierta la ya decreciente demanda de madera de la minería del carbón, es la Compañía Agrícola y Forestal Colcura la que continúa evaluando ensayos anteriores de especies y probando con nuevas especies en la zona costera de Arauco. Las prioridades cambian hacia la búsqueda de especies que permitieran ir formando gradualmente bosques diversificados, menos vulnerables a eventuales plagas y enfermedades.

El mismo autor entrega una lista de especies evaluadas en diferentes ensayos establecidos en la primera mitad del siglo XX y comenta que las especies de este listado fueron prácticamente descartadas por variadas razones, como baja resistencia a plagas o a frío, mala forma, madera poco resistente y otras, pero la principal es que crecen menos o mucho menos que *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*.

<i>Eucalyptus resinifera</i>	<i>Cupressus macrocarpa</i>	<i>P. palustre</i>
<i>E. diversicolor</i>	<i>C. torulosa</i>	<i>P. montezuma</i>
<i>E. robusta</i>	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	<i>P. contorta</i>
<i>E. amygdalina</i>	<i>Pinus patula</i>	<i>P. longifolia</i>
<i>E. saligna</i>	<i>P. caribea</i>	<i>P. tuberculata</i>
<i>E. tereticornis</i>	<i>P. pinaster</i>	<i>P. coulteri</i>
<i>E. occidentales</i>	<i>P. canariensis</i>	<i>P. banksiana</i>
<i>E. rudis</i>	<i>P. taeda</i>	<i>P. montana</i>
<i>E. marginata</i>	<i>P. attenuata</i>	<i>P. monticola</i>
<i>E. gigantea</i>	<i>P. attenuiradiata</i>	<i>P. rigida</i>
<i>E. viminalis</i>	<i>P. murrayana</i>	<i>P. densiflora</i>
<i>E. gunnii</i>	<i>P. corsicana</i>	<i>P. thumbergii</i>
<i>E. punctata</i>	<i>P. strobus</i>	<i>P. pinea</i>
<i>E. rostrata</i>	<i>P. ponderosa</i>	<i>P. sylvestris</i>
<i>E. melliodora</i>	<i>P. echinata</i>	

Albert y Peters fueron indudablemente los precursores de las plantaciones forestales en el país y desarrollaron grandes trabajos de investigación, dentro de las comparativamente muy limitadas posibilidades de información y comunicaciones de hace más de 100 años. Acumularon una gran cantidad de información sobre el desarrollo de numerosas especies en Chile y tuvieron el acierto o la fortuna de trabajar tempranamente con *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, especies de gran adaptación a amplias regiones del país.

Ambos cometieron en alguna medida el error de comparar el crecimiento de todas las especies con *Eucalyptus globulus* y *Pinus radiata*, sin pensar en otros sitios, otros usos y otras rotaciones, sin embargo eran las necesidades de la época. Esto ocurrió principalmente con Peters, ya que su objetivo central era la madera para la minería del carbón, Albert en tanto, dio más amplitud a su búsqueda. Agrícola y Forestal Colcura, posteriormente, amplía más el espectro, contemplando riesgos fitosanitarios, variedad de productos y nuevos sitios.

El Programa de Introducción de Especies del Instituto Forestal

En 1962, con la creación del Instituto Forestal, se da inicio a un programa sistemático de introducción de especies forestales al país. Se efectúa una zonificación geográfica general sobre la base de grandes grupos de suelos y regiones climáticas y, entre los años 1962 y 1975, se cubre el país con más de 60 ensayos, entre las Regiones de Coquimbo y Aysén, en los cuales se prueba unas 200 especies, tanto coníferas como latifoliadas.

En más de 8 mil parcelas pequeñas, de 49 plantas en los ensayos de la parte norte (hasta la Región de Valparaíso) y 100 plantas en aquellos de la parte sur, en un diseño de parcelas al azar con 3 repeticiones, se evalúa la adaptabilidad y desarrollo de una gran cantidad de especies durante más de 20 años.

Entre las especies incluidas en el programa de INFOR se encuentran 45 del género *Eucalyptus*. Las provisiones de semillas eran obtenidas principalmente del Centro de Semillas de CSIRO³ Australia, solicitando semillas adecuadas en cada caso de acuerdo principalmente a comparación climática origen-destino. Las semillas llegaban debidamente identificadas con su código de procedencia y, dadas las disponibilidades del Centro de CSIRO, en la medida que el programa se ampliaba en materia de especies y lugares de ensayo, el Centro no siempre podía proporcionar las mismas procedencias, de este modo después de unos pocos años se contó con varias procedencias para muchas de las especies y estas eran tratadas en el diseño experimental como especies distintas, subiendo el número original de 45 a cerca de 100.

Los primeros ensayos del programa fueron establecidos el año 1962 en 5 lugares entre las Regiones del Bio Bio y Aysén, pero en estos se incluyó solo coníferas. En 1963 se instala 4 ensayos más en los que se empieza a incluir eucaliptos y ya a partir de 1964 se amplía el programa en materia de especies y ensayos.

La mayor parte de los ensayos es establecida entre los años 1964 y 1969. El programa contempla un seguimiento de estos, con una medición de supervivencia (%) y altura (m) un mes después de la plantación y después mediciones sucesivas a las edades de 1, 3 y 5 años para continuar posteriormente cada 5 años. El DAP (diámetro a la altura del pecho) se empieza a medir en todo ejemplar cuando alcanza un mínimo de 5 cm para esta variable.

En el Cuadro N° 1 se indica para cada especie de eucalipto el año en que es por primera vez incluida en parcelas experimentales del programa en algún ensayo en cada región del país. Este año sería el año de la introducción de la especie en cada región y el más temprano de ellos correspondería a la introducción de la especie al país (coloreado verde).

Hay varios casos en los que existe información respecto de que la especie habría sido probada anteriormente por Albert (coloreado amarillo), no obstante, con la sola excepción de *Eucalyptus globulus ssp globulus*, la introducción de las especies al país corresponde al programa de INFOR, dado que de las restantes no se volvió a tener información y su uso no se extendió.

Las sucesivas evaluaciones de los diferentes ensayos entregaron progresivamente

3 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. Australia.

información sobre la respuesta de las especies en los distintos sitios y tempranamente empezaron a destacar varias especies de eucaliptos por su rápido y vigoroso crecimiento, sobrepasando notablemente en muchos casos los alcanzados por pino radiata y *Eucalyptus globulus ssp globulus*.

Barros *et al.* (1979 y 1979a) hacen una evaluación completa de estas experiencias, destacan los resultados a lo largo del país, hacen una zonificación del país, determinan la cobertura geográfica de los ensayos existentes y definen las necesidades de ensayos complementarios para completar la cobertura.

Cuadro N° 1
ESPECIES DEL GÉNERO *Eucalyptus* INCLUIDAS EN EL PROGRAMA DE INFOR
Y AÑO DE SU INTRODUCCIÓN AL PAÍS

ESPECIE	REGIÓN								
	Cóquimbo	Valparaíso	Metropolitana	O'Higgins	Maule	Bío Bio	La Araucanía	Los Ríos	Los Lagos
Año Primera Plantación Experimental									
<i>Eucalyptus astringens</i>	66	64	64						
<i>Eucalyptus behniana</i>	67		67						
<i>Eucalyptus bicostata</i>		68		65	65	64	65		
<i>Eucalyptus botryoides</i>							70	70	
<i>Eucalyptus basistoana</i>						65			
<i>Eucalyptus brockwayi</i>	65	64	66	66					
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	66	66	66	66					
<i>Eucalyptus citriodora</i>	67	67	67						
<i>Eucalyptus cinerea</i>	68	68							
<i>Eucalyptus cladocalyx</i>	65	64	66	66					
<i>Eucalyptus cornuta</i>					64	64		64	
<i>Eucalyptus dalrympleana</i>				72		64	71	63	
<i>Eucalyptus delegatensis</i>				66	67	64	63	67	67
<i>Eucalyptus diversicolor</i>	67	67	67	67					
<i>Eucalyptus fastigata</i>				68	67	67			
<i>Eucalyptus flocktoniae</i>	66	64							
<i>Eucalyptus fruticetorum</i>	65	64	66	66					
<i>Eucalyptus globulus</i>	65	65	66	65	65	65	65	67	67
<i>Eucalyptus gomphocephala</i>	69	68	69	65		64			
<i>Eucalyptus grandis</i>				68	67	64			
<i>Eucalyptus gunnii</i>				70	68	67	65	64	68
<i>Eucalyptus maidenii</i>				70	65	64			
<i>Eucalyptus marginata</i>					65	65			
<i>Eucalyptus melliodora</i>		64		69	69				
<i>Eucalyptus microtheca</i>	66	66	66						
<i>Eucalyptus muelleriana</i>							70		
<i>Eucalyptus niphophila</i>								65	64
<i>Eucalyptus nitens</i>				67	68	68			
<i>Eucalyptus obliqua</i>				65	65	64	65	70	
<i>Eucalyptus occidentalis</i>			67						
<i>Eucalyptus oleosa</i> var <i>glauca</i>	65								
<i>Eucalyptus pauciflora</i>								64	
<i>Eucalyptus pilularis</i>						64			
<i>Eucalyptus punctata</i>						64			
<i>Eucalyptus quadrangulata</i>							71		
<i>Eucalyptus regnans</i>		71		65	67	65	67	65	69
<i>Eucalyptus resinifera</i>	69	68	69	68	69				
<i>Eucalyptus saligna</i>				67	67	64			
<i>Eucalyptus salomonophloia</i>	66	64	66	66					
<i>Eucalyptus sideroxylon</i>	70	64							
<i>Eucalyptus straticalyx</i>		67							
<i>Eucalyptus tereticornis</i>						64			
<i>Eucalyptus torquata</i>	66	66							
<i>Eucalyptus viminalis</i>					69	69	69	69	

(Fuente: Barros *et al.*, 1979)

Introducción INFOR 1963 en adelante:

Probadas inicialmente por Albert

Prado *et al.* (1986) hacen una evaluación de este programa de investigación y entregan información detallada sobre el desarrollo de una cantidad de especies a través del país y de acuerdo a la zonificación geográfica mencionada, basada en condiciones de clima y suelos, más detallada que la inicialmente utilizada en el programa original, que solo consideraba los grandes grupos de suelos.

Tres años después, Prado y Barros (1989) entregan información adicional sobre resultados del programa, esta vez referida a eucaliptos e incorporando también resultados de investigaciones sobre técnicas de establecimiento de plantaciones, selección de procedencias de semillas y otros aspectos.

En términos generales, la información entregada por Prado y Barros (1989) se refiere a la zona semiárida, la zona central y a la zona sur del país. No se incluye la zona norte (La Serena al norte), donde las posibilidades de forestación se limitan solo a los valles y otros sectores con disponibilidad de agua o a un reducido número de especies particularmente resistentes a la restricción hídrica. Tampoco es incluida la zona austral (Regiones de Aysén y Magallanes), por no estar cubierta suficientemente por el conjunto de ensayos del programa de introducción de especies.

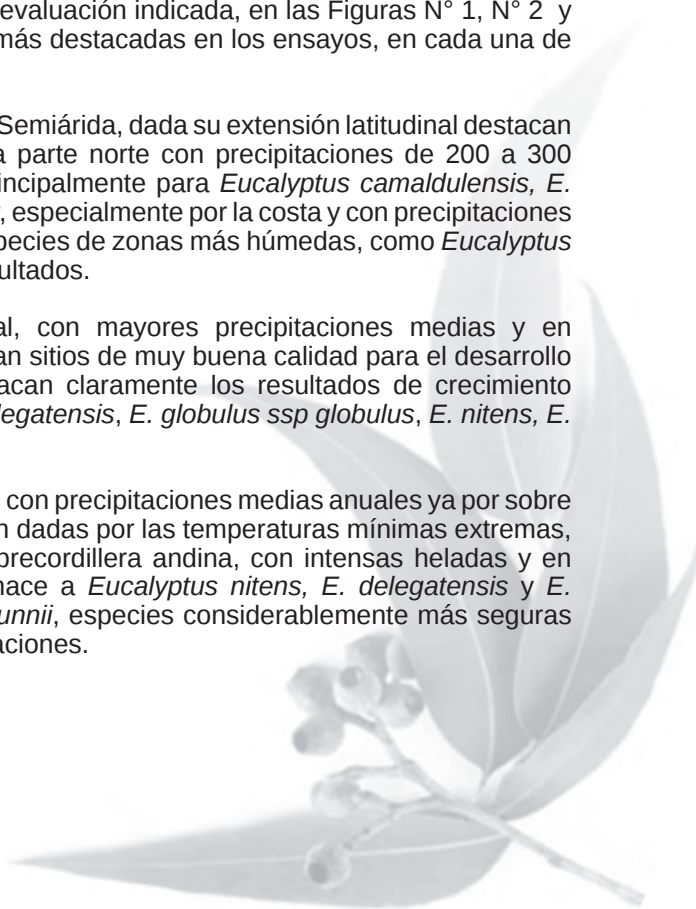
Barros *et al.* (1979a) habían desarrollado una zonificación del país para los efectos del programa, basada en una superposición cartográfica de información de suelo y clima, subdividiendo el país desde Coquimbo a Los Lagos en tres grandes regiones, que de norte a sur son Mediterránea Semiárida (Regiones de Coquimbo a Bio Bio), Mediterránea Central (Regiones de Bio Bio y La Araucanía) y Oceánica de Los Lagos (Regiones de Los Ríos y Los Lagos). Cada una de estas es subdividida a su vez en las que fueron denominadas Unidades Edafoclimáticas, dentro de cada una de las cuales se asume una cierta uniformidad de condiciones generales de suelo y clima, y de estas, aquellas que tenían al menos un ensayo representativo dentro de sus límites fueron consideradas unidades cubiertas por el programa.

Las evaluaciones y resultados entregados por Prado *et al.* (1986) sobre el programa y por Prado y Barros (1989) sobre eucaliptos en particular están basadas en la zonificación de Barros *et al.* (1979a). En base a la segunda evaluación indicada, en las Figuras N° 1, N° 2 y N° 3 se señalan las especies de eucaliptos más destacadas en los ensayos, en cada una de las grandes regiones antes indicadas.

Respecto de la Región Mediterránea Semiárida, dada su extensión latitudinal destacan en ella una cantidad de especies, desde la parte norte con precipitaciones de 200 a 300 mm, donde existen posibilidades de uso principalmente para *Eucalyptus camaldulensis*, *E. cladocalyx* y *E. sideroxylon*, hasta la parte sur, especialmente por la costa y con precipitaciones en torno a 600 mm y más, donde algunas especies de zonas más húmedas, como *Eucalyptus nitens* y *E. regnans* ya muestran buenos resultados.

En la Región Mediterránea Central, con mayores precipitaciones medias y en especial en las zonas costeras, se encuentran sitios de muy buena calidad para el desarrollo de plantaciones de eucaliptos y aquí destacan claramente los resultados de crecimiento obtenidos principalmente con *Eucalyptus delegatensis*, *E. globulus ssp globulus*, *E. nitens*, *E. regnans* y *E. fastigata*.

En la Región Oceánica de Los Lagos, con precipitaciones medias anuales ya por sobre los 1.000 mm, las principales limitantes están dadas por las temperaturas mínimas extremas, principalmente en sectores interiores y de precordillera andina, con intensas heladas y en algunos casos eventuales nevadas. Esto hace a *Eucalyptus nitens*, *E. delegatensis* y *E. regnans*, y en especial a *E. viminalis* y *E. gunnii*, especies considerablemente más seguras que *E. globulus ssp globulus* para las plantaciones.



REGIÓN OCEÁNICA DE LOS LAGOS

T media anual: 11 - 12 °C
pp media anual: 1200 - 2350 mm

Eucalyptus dalrympleana
Eucalyptus delegatensis
Eucalyptus globulus ssp globulus
Eucalyptus gunnii
Eucalyptus nitens
Eucalyptus obliqua
Eucalyptus regnans
Eucalyptus viminalis



(Fuente: Prado y Barros, 1989)

Figura N° 3
ESPECIES DESTACADAS REGIÓN OCEÁNICA DE LOS LAGOS

Un buen ejemplo de los resultados obtenidos son aquellos registrados en la Estación Experimental Antiquina de INFOR, en la zona costera de Arauco, Región Mediterránea Central (Cuadro N° 2).

Cuadro N° 2
DESARROLLO DE ESPECIES DEL GÉNERO *Eucalyptus* ESTACIÓN EXPERIMENTAL ANTIQUINA

Especie	DAP (cm)	H (m)	S (%)	V (m ³ /ha)	CAM (m ³ /ha/año)	Edad (Años)
<i>Eucalyptus nitens</i>	23,7	22,9	86,6	1.152	77	15
<i>Eucalyptus regnans</i>	22,3	23,3	88,0	940	63	15
<i>Eucalyptus delegatensis</i>	20,6	21,0	78,0	749	50	15
<i>Eucalyptus globulus ssp globulus</i>	20,5	21,3	80,0	664	44	15
<i>Eucalyptus fastigata</i>	19,3	21,7	82,7	664	44	15
<i>Pinus radiata</i>	23,4	23,2	60,0	550	34	16

(Fuente: Prado et al., 1986)

S: Supervivencia sobre 2.500 arb/ha densidad inicial

CAM: Crecimiento Medio Anual

Se puede apreciar que *Eucalyptus nitens*, *E. regnans* y *E. delegatensis*, con tasas de incremento volumétrico por sobre los 50 m³/ha/año, superan claramente el desarrollo de *Eucalyptus globulus ssp globulus* y pino radiata; y que *E. fastigata* iguala al primero y supera claramente también a pino radiata. Esto pese a que, tratándose de un sitio de muy buena calidad, estas especies tradicionales de la forestación en el país muestran un muy buen desarrollo.

Resultados como los obtenidos en este ensayo en la zona costera de la Región del Bio Bio, fueron registrados en diferentes otros ensayos hacia el norte, hacia el sur y hacia zonas interiores, con variados niveles en materia de rendimientos, pero con similar tendencia general en la respuesta relativa de las especies.

Los resultados obtenidos en las diferentes regiones impulsaron a INFOR a iniciar diferentes investigaciones en torno a la silvicultura de las especies más destacadas. Así fueron desarrolladas técnicas de viverización de plantas, introduciéndose el uso de los contenedores; de fertilización combinada con el riego (fertiriego) y de los tratamientos de endurecimiento de plantas; y también las técnicas intensivas de establecimiento de plantaciones, incluyendo una intensa preparación de suelos con subsolado en el caso de suelos más compactados, control de competencia y adiciones iniciales de fertilizantes. Todas estas, técnicas de amplia utilización actualmente.

Igualmente INFOR inició ensayos incorporando la variable procedencia de semillas, antes no considerada, dada la limitada cantidad de procedencias con que se trabajaba en los inicios del programa. Fueron establecidos ensayos con varias procedencias para las especies más destacadas y esto derivó posteriormente en pruebas de completas colecciones de procedencias de semillas en las que también se consideraron progenies en cada caso, dando origen a los programas de mejoramiento genético y en 1991 INFOR establece las bases para el mejoramiento genético de eucaliptos en el país (Infante *et al.*, 1991).

Numerosas otras publicaciones de INFOR proporcionan antecedentes de ensayos y proyectos de investigación posteriores, relacionados con adaptación de especies en diferentes sitios a lo largo del país, con técnicas de establecimiento de plantaciones y con selección de procedencias.

Barros (1993) entrega resultados de un ensayo establecido en el predio Los Copihues, en la Cordillera de la Costa de la Región de Los Ríos, cercano a Valdivia, en el que fueron probadas algunas procedencias de las especies más destacadas (Cuadro N° 3).

Cuadro N° 3
DESARROLLO DE ESPECIES Y PROCEDENCIAS DE *Eucalyptus* PREDIO LOS COPIHUES

Especie	Procedencia		6 Años		10 Años		12 Años				CAM	CAC
			S	V	S	V	S	DAP	H	V	12 Años	10 a 12 Años
			(%)	(m³/ha)	(%)	(m³/ha)	(%)	(cm)	(m)	(m³/ha)	(m³/ha/año)	
<i>Eucalyptus nitens</i>	11814	NSW	78,7	119	78,7	340	78,7	24,6	24,0	549	46	105
<i>Eucalyptus nitens</i>	12211	VIC	73,3	84	72,0	284	72,0	24,1	23,3	452	38	84
<i>Eucalyptus nitens</i>	12175	VIC	65,3	60	62,7	247	62,7	23,4	24,6	438	37	96
<i>Eucalyptus nitens</i>	12114	NSW	69,3	77	66,7	268	65,3	24,2	23,0	411	34	72
<i>Eucalyptus regnans</i>	11619	TAS	52,0	56	49,3	212	49,3	24,3	25,8	355	30	72
<i>Eucalyptus regnans</i>	12463	VIC	49,3	32	49,3	176	49,3	23,3	24,9	330	28	77
<i>Eucalyptus delegatensis</i>	9141	NSW	56,0	29	56,0	178	54,7	20,8	22,6	283	24	53
<i>Eucalyptus delegatensis</i>	9989	TAS	62,7	32	62,7	173	60,0	20,2	21,3	275	23	51
<i>Eucalyptus regnans</i>	12074	TAS	36,0	24	36,0	142	36,0	24,1	26,5	270	23	64
<i>Eucalyptus delegatensis</i>	12295	TAS	44,0	18	42,7	112	42,0	17,7	22,7	204	17	46
<i>Eucalyptus globulus ssp globulus</i>	11615	TAS	49,3	17	48,0	79	45,3	20,5	16,8	131	11	26

(Fuente: Barros, 1993)

S: Supervivencia sobre 1.600 arb/ha densidad inicial

CAM: Crecimiento Anual Medio

CAC: Crecimiento Anual Corriente entre edades indicadas

NSW: New South Wales VIC: Victoria TAS: Tasmania

Este ensayo fue establecido en 1981, empleando plantas en contenedor de una temporada en vivero, preparación de suelos en casillas simples, control manual de competencia y no se aplicó fertilización inicial. Esta plantación experimental fue afectada por intensas heladas y fuerte competencia de malezas, situación que se refleja en la temprana reducción de densidad, la cual como se vio en el caso del ensayo en Antiquina debiera estar al menos por sobre el 70%. Técnicas de establecimiento más intensas y un replante a fin de la primera temporada con seguridad habrían asegurado una mayor supervivencia de plantas y, en consecuencia, mejores resultados.

No obstante, el ensayo muestra un muy buen crecimiento de las especies probadas, con la excepción de *Eucalyptus globulus*, que es la de menor resistencia a frío del grupo, y con importantes diferencias entre procedencias, destacando por sobre todas la procedencia 11814 de *Eucalyptus nitens* (Anembo NSW), que registra 549 m³/ha, un crecimiento anual medio de 46 m³/ha/año a los 12 años de edad y un crecimiento anual corriente entre los 10 y 12 años de edad que supera los 100 m³/ha/año.

Resultados como los obtenidos en Antiquina y en Los Copihues explican el fuerte incremento de la participación de especies de eucaliptos en las plantaciones forestales y la instalación de plantas de celulosa de fibra corta basadas en este recurso.

Los resultados indicados explican también la intensificación de la investigación en torno a estas especies, desde ahondar en las técnicas de vivero y propagación y de establecimiento de plantaciones hasta el mejoramiento genético, el manejo silvícola y las propiedades y utilización de sus maderas.

PLANTACIONES FORESTALES

Evolución de las Plantaciones Forestales

Toda la información reunida sobre el comportamiento de diferentes especies introducidas al país, desde los inicios con los trabajos pioneros de Albert y Peters hasta el programa sistemático de introducción y selección de especies de INFOR, sumada a los resultados de diversas investigaciones de INFOR en el área de silvicultura, del manejo y del mejoramiento genético de la principales especies, y de las propiedades y utilización de la madera, han propiciado la creación de importantes recursos forestales mediante la forestación con especies de rápido crecimiento, proceso que era paulatino desde mediados del siglo pasado y que se aceleró notablemente desde los años 70 y 80 de aquél hasta ahora.

Se estima que en el año 1973 la superficie de plantaciones en el país era de unas 450 mil hectáreas, constituida en más de un 85% por pino radiata.

Las actualizaciones anuales de las plantaciones que INFOR efectúa en el país indican que en 10 años, para 1983, esta superficie se había ya duplicado, acercándose al millón de hectáreas plantadas y subiendo la participación de pino radiata a algo más del 90%. Para el año 2011 en tanto, la superficie de plantaciones se ha duplicado nuevamente, superando largamente los dos millones de hectáreas y mostrando ya una mayor diversificación de especies, con pino radiata en un 62%, eucaliptos en 32% y otras especies en algo más del 6% (Cuadro N° 4 y Figura N° 4).

Cuadro N° 4
SUPERFICIE PLANTACIONES FORESTALES SEGUN ESPECIE Y AÑO
1973 – 2011

Año	<i>Pinus radiata</i>	<i>Eucalyptus ssp</i>	Otras Especies	Total
(ha)				
1973	400.000		50.000	450.000
1980	716.939	33.200	44.371	794.510
1983	967.919	40.419	59.550	1.067.888
1985	1.040.250	51.173	97.212	1.188.635
1990	1.243.293	101.700	115.537	1.460.530
1995	1.379.746	302.248	136.191	1.818.185
2000	1.474.733	358.616	155.712	1.989.061
2005	1.419.300	552.338	153.461	2.125.099
2010	1.471.800	695.701	174.343	2.341.844
2011	1.480.803	759.332	154.731	2.394.866

(Fuente: INFOR, 2013)

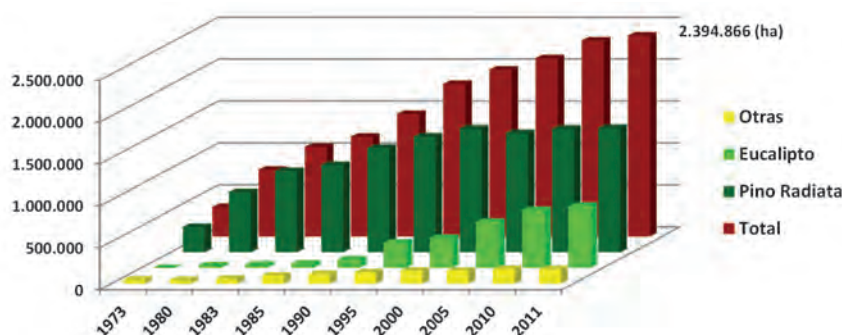


Figura N° 4
EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE DE PLANTACIONES 1973-2011

Si bien existen plantaciones forestales en todo el país, hay una fuerte concentración de estas en las Regiones de Maule, Bio Bio y La Araucanía, que en conjunto reúnen el 77% de la superficie total, en especial la Región del Bio Bio, que representa el 38% del total plantado en el país (Figura N° 5).

Esta concentración geográfica se debe al excelente crecimiento que alcanzan las plantaciones en la zona centro sur del país y a que se ha desarrollado paralelamente una buena infraestructura caminera y portuaria, además de toda la capacidad industrial primaria, tanto para la transformación química como mecánica de la madera.

Esta situación fue también propiciada por la disponibilidad y valor de los suelos adecuados para forestación que existía en estas regiones del país en las primeras etapas de este proceso de repoblación forestal.

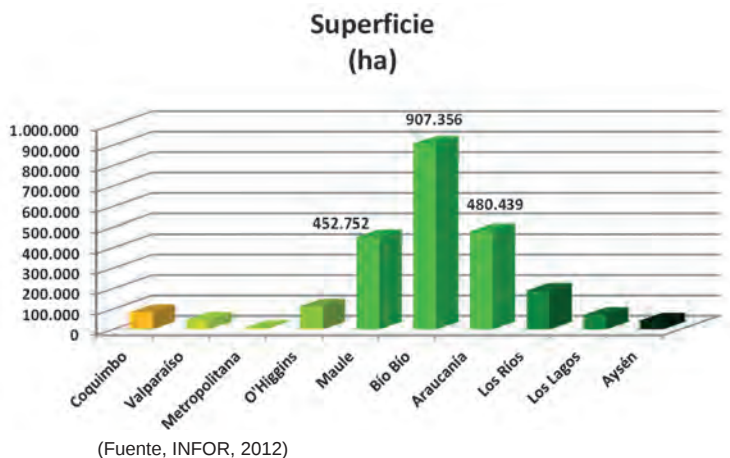


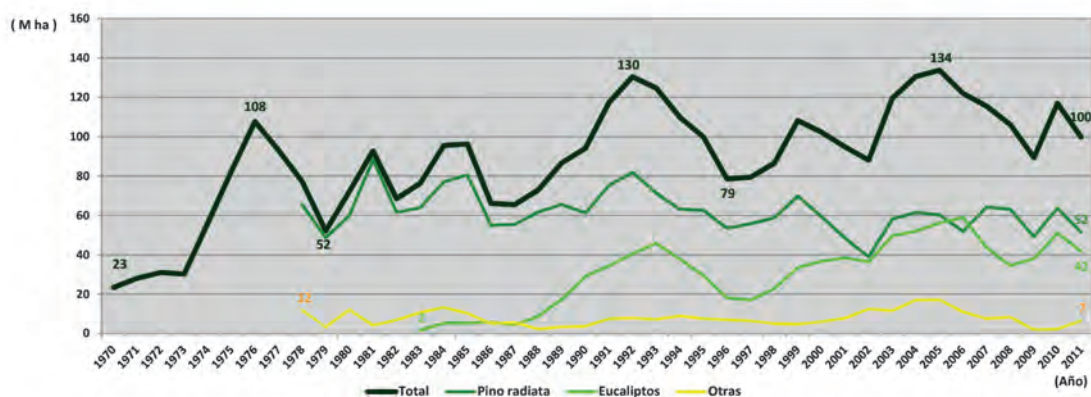
Figura N° 5
PLANTACIONES FORESTALES POR REGIÓN (2011)

Las plantaciones forestales en general han recuperado suelos forestales desprovistos de cubierta forestal que se encontraban bajo severos procesos de erosión y, en algunos casos, suelos agrícolas y ganaderos de secano, abandonados por estas formas de uso debido a escasos rendimientos y también bajo fuertes procesos erosivos. En consecuencia, las plantaciones no han representado una presión en materia de sustitución de bosques nativos, han ocupado terrenos en los que antiguamente, desde los tiempos de la Colonia, estos fueron eliminados por grandes incendios forestales o por cortas a tala rasa para despejar suelos para uso agrícola y ganadero.

Tasa de Plantación

Durante las últimas cuatro décadas se ha estado plantando a una tasa media anual cercana a 100 mil hectáreas, hoy el país dispone de 2,4 millones de hectáreas de plantaciones y ya se ha destacado la importancia que este recurso renovable ha alcanzado en el país como base de un importante y acelerado desarrollo industrial, cuyos productos han alcanzado exitosamente los principales mercados externos, y ha representado además una progresiva liberación de la presión sobre los bosques nativos.

Un factor determinante en este acelerado proceso de repoblación forestal ha sido una sostenida política estatal de fomento a las plantaciones forestales, iniciada en 1974 y mantenida con algunas modificaciones hasta la actualidad. Desde la puesta en vigencia de la mencionada legislación (DL N° 701 de 1974 y modificaciones posteriores) la tasa media de plantación anual es de 96.072 ha (1975 – 2010), por lo que han sido plantados unos 3,5 millones de hectáreas en 36 años (Figura N° 6), lo que al descontar el consumo en el período da los 2,4 millones de hectáreas actuales.



(Fuente: INFOR, 2012)

Figura N° 6
TASA DE PLANTACIÓN POR AÑO Y ESPECIES

El retorno de exportaciones, que en 1975 alcanzaba a 126 millones de US\$ FOB, para el año 2011 se sitúa en casi 6 mil millones de US\$ FOB y, consecuentemente, el consumo de madera en trozas industriales se ha elevado en el mismo lapso de tiempo de unos 4 millones de metros cúbicos por año a un monto superior a los 39 millones de metros cúbicos por año, consumo que en términos de superficie de plantaciones ha variado de unas 8 a 10 mil hectáreas anuales a más de 70 mil hectáreas anuales.

La tasa de plantación anual ha experimentado altos y bajos, dados por la situación económica general (crisis económicas mundiales), por variables climáticas (sequías) y por la vigencia o expectativas de vigencia de los incentivos estatales a la forestación.

La primera reducción de importancia de esta tasa se produce a fines de los años 70, cuando el Estado deja de plantar, lo que representaba al menos el 50% de la superficie plantada anualmente. En adelante las plantaciones son efectuadas por el sector privado. Otra baja de importancia se produce a mitad de los años 90 cuando expiran los 20 años de vigencia contemplados en la legislación de fomento de 1974, la cual es renovada posteriormente, y a fines de la primera década del presente siglo se empieza a producir una baja nuevamente por razones similares. El Gobierno prorroga una vez más la vigencia de la ley, esta vez por dos años hasta 2012, y la tasa de plantación recupera sus niveles en el año 2010 por sobre las 100 mil hectáreas. Actualmente está en proceso legislativo un proyecto de ley para mantener el fomento estatal a la forestación después del año 2012.

Hasta mediados de los años 90 la tasa de plantación superaba ampliamente la tasa de corta anual y se incorporaban importantes superficies anualmente al total de plantaciones en el país, posteriormente su componente forestación empieza a decrecer, con cierta recuperación a mitad de la primera década del siglo XXI y una nueva reducción para fines de esta, dominando la componente reforestación⁴.

⁴ La legislación vigente otorga incentivos estatales para la forestación y hace obligatoria la reforestación sin incentivos estatales. La diferencia entre forestación y reforestación la establece esta legislación; todo suelo forestal que en 1974 o después ha tenido una cubierta vegetal con algún valor económico no es objeto de forestación y, por el contrario, suelos forestales que en 1974 o después no han tenido una cubierta vegetal con valor económico son objeto de forestación con los incentivos que otorga la ley. Una unidad de superficie solo puede recibir los incentivos una vez y toda corta efectuada desde el año 1974 en adelante grava el terreno con la obligación de reforestación sin incentivos.

Dado el progresivo incremento del nivel de corta anual las cifras de reforestación se han elevado y ya en los últimos años, pese a mantenerse una tasa de plantación importante, la incorporación de superficies al total plantado en el país está en unas 30 mil hectáreas anuales y menos (Figura N° 7), dado que la diferencia corresponde a reposición de plantaciones cosechadas.



Figura N° 7
TASA DE PLANTACIÓN ANUAL, FORESTACIÓN Y REFORESTACIÓN

Desde fines de los años 80 del siglo pasado la tasa de plantación de eucaliptos se incrementa significativamente y en la primera década del presente siglo es similar a aquella de pino radiata, incluso superándola a mitad de esta (Figura N° 6). Pese a que la incorporación masiva de eucaliptos en las plantaciones es relativamente reciente, la tasa de reforestación o reposición de superficies cosechadas se hace ya notoria dado que la rotación que se está empleando en estas plantaciones es corta, 11 a 13 años, por lo que ya existe un consumo anual creciente (Figura N° 8).

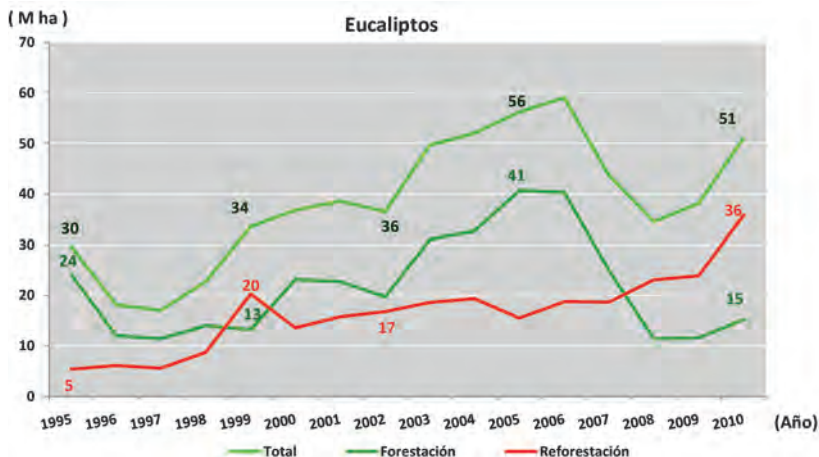


Figura N° 8
TASA DE PLANTACIÓN ANUAL, FORESTACIÓN Y REFORESTACIÓN EUCALIPTOS

Eucalyptus globulus ssp globulus retoña o rebrota vigorosamente desde los tocones (cepas) que quedan de la cosecha, por lo que no sería necesario reforestar sino solo manejar estos rebrotes para obtener un nuevo bosque (conocido en silvicultura como Monte Bajo, a diferencia del Monte alto, originado en una plantación o directamente de semillas) y la corta del bosque original por tanto no afectaría la superficie plantada, solo la edad y la estructura.

Sin embargo, dados los fuertes programas de mejoramiento genético que se están desarrollando para eucaliptos, las grandes empresas forestales no están empleando la alternativa de monte bajo debido a que al final de cada turno en monte alto ya se dispone de material mejorado, genéticamente superior en términos de crecimiento o de la aptitud para pulpa de la madera producida, que es el principal uso actual de los eucaliptos en el país. Esto haría más conveniente plantar nuevamente, es decir establecer un nuevo monte alto, que aplicar el manejo de retoños. En consecuencia, los tocones o cepas son eliminados previamente y existe un consumo en términos de superficie, que se repone cuando se establece la nueva plantación.

ESPECIES EN LAS PLANTACIONES

Las superficies totales de plantaciones dadas anteriormente corresponden a las entregadas por la actualización de superficie de plantaciones de INFOR a diciembre 2011 (INFOR, 2013), que incluye las Regiones de Coquimbo a Aysén. La actualización proporciona información desagregada para las principales especies por región del país, reconociendo 6 especies o grupos de especies principales y una categoría otras especies. En el Cuadro N° 5 se indica la superficie por región y especie y se incorpora información disponible para eucaliptos en regiones del norte.

Cuadro N° 5
SUPERFICIE DE PLANTACIONES FORESTALES SEGÚN ESPECIE Y REGIÓN 2011

Región	<i>Atriplex</i> <i>spp</i>	<i>Eucalyptus</i> <i>globulus</i>	<i>Eucalyptus</i> <i>nitens</i>	<i>Eucalyptus</i> <i>spp</i>	<i>Pinus</i> <i>radiata</i>	<i>Pinus</i> <i>ponderosa</i>	<i>Pseudotsuga</i> <i>menziessii</i>	Otras Especies	Total
(ha)									
Arica									0
Tarapacá		309							309
Antofagasta		2							2
Atacama		1.325							1.325
Coquimbo	60.240	2.718		94				20.816	83.868
Valparaíso		37.675		362	8.879			743	47.659
Metropolitana		5.738		96	17			255	6.106
O'Higgins		42.743	14	1	68.069			1.937	112.764
Maule		41.934	1.502	75	405.126	8	217	3.890	452.752
Bio Bio		208.705	76.870	6.232	611.384	702	389	3.075	907.358
La Araucanía		143.393	55.844	3.972	265.972	2.701	7.023	1.534	480.439
Los Ríos		20.835	51.688	5.775	105.535	3	4.123	2.153	190.112
Los Lagos		19.788	30.905	2.362	15.821	258	606	289	70.029
Aysén			7	3		25.164	4.423	14.185	43.782
Magallanes									0
Total	60.240	525.166	216.830	18.972	1.480.803	28.836	16.781	48.877	2.396.505

(Fuente: Elaboración propia en base a INFOR, 2012)

En la categoría otras especies, están incluidas numerosas especies que la escala de trabajo del programa de actualización no permite identificar o que su reducida participación no justifica mayor desagregación en las cifras nacionales. Se sabe que hay dentro de esta categoría especies de diversos géneros que tienen una participación marginal aún en las plantaciones en distintas regiones del país, entre estas se pueden mencionar otras especies

del género *Eucalyptus* (*E. camaldulensis*, *E. cladocalyx*, *E. delegatensis*, *E. regnans*, *E. sideroxylon*, *E. smithii*, *E. viminalis* y otras); otras especies del género *Pinus* (*P. contorta*, *P. pinea*, *P. muricata*, *P. sylvestris*); especies del género *Acacia* (*A. dealbata*, *A. mearnsii*, *A. melanoxylon*, *A. saligna*); especies, híbridos y cultivares de los géneros *Populus* y *Salix*; otras de los géneros *Acer*, *Abies*, *Castaena*, *Cedrus*, *Chamaecyparis*, *Grevillea*, *Juglans*, *Larix*, *Liquidambar*, *Picea* y otros; y algunas especies nativas del género *Nothofagus* (*N. obliqua*, *N. alpina*, *N. dombeyi*, *N. pumilio*) y otras (Figura N° 9).

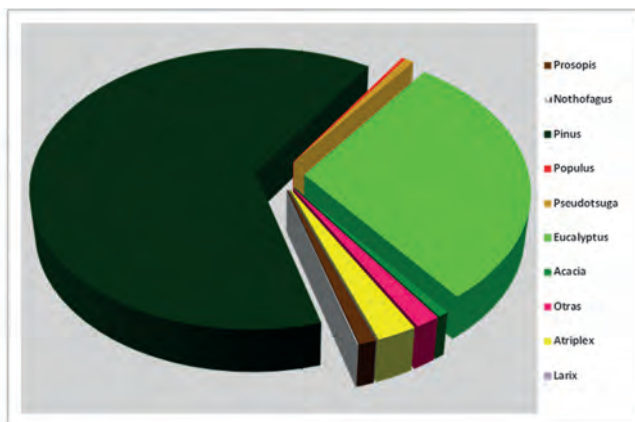


Figura N° 9
PRINCIPALES GÉNEROS EN LAS PLANTACIONES FORESTALES

Además, el programa de actualización no incluye las regiones de los extremos norte y sur (Arica a Atacama y Magallanes, respectivamente) que en conjunto reúnen unas 30 mil hectáreas adicionales de plantaciones, con especies de los géneros *Prosopis* (*P. tamarugo*, *P. alba*, *P. chilensis*) y otros, y otras coníferas y algunas nativas en el extremo sur; tampoco incluye bosques o plantaciones mixtas (nativas y exóticas), y existe una cierta subestimación en plantaciones nuevas de 1 a 2 años, debido a que no son fácilmente distinguibles mediante los métodos de percepción remota que utiliza. Esto permite suponer que hay unas 200 mil hectáreas adicionales a la superficie que entrega la actualización de INFOR y que el total de plantaciones en el país sería cercano a los 2,6 millones de hectáreas.

Los eucaliptos han incrementado fuertemente su participación en las plantaciones forestales y es así como de unas 33 mil hectáreas en 1980 se ha aumentado a unas 760 mil hectáreas en 2011. Estas plantaciones están dominadas por *Eucalyptus globulus ssp globulus*, con 525 mil hectáreas y *Eucalyptus nitens*, con 217 mil hectáreas, pero existe ya una incipiente participación de varias otras especies del género (Cuadro N° 6 y Figura N° 10).

Cuadro N° 6
SUPERFICIE DE PLANTACIONES EUCALIPTOS SEGÚN ESPECIE Y REGIÓN 2011

Region	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus nitens</i>	<i>Eucalyptus delegatensis</i>	<i>Eucalyptus smithii</i>	<i>Eucalyptus regnans</i>	<i>Eucalyptus viminalis</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>Eucalyptus spp</i>	Total
(ha)									
Arica									
Tarapacá	309								309
Antofagasta	2								2
Atacama	1.325								1.325
Coquimbo	2.718						1	93	2.812
Valparaíso	37.675						348	14	38.037
Metropolitana	5.738						66	30	5.834
O'Higgins	42.743	14					1		42.758
Maule	41.934	1.502			1		57	17	43.511
Bio Bio	208.705	76.870	545	27	579	197	13	4.871	291.808
La Araucanía	143.393	55.844	93		72	70		3.737	203.209
Los Ríos	20.835	51.689	342		62	2		5.369	78.298
Los Lagos	19.788	30.905	80		2			2.280	53.055
Aysén		7						3	10
Magallanes									
Total	525.166	216.830	1.060	27	716	269	486	16.414	760.968

(Fuente: Elaboración propia en base a INFOR, 2012)

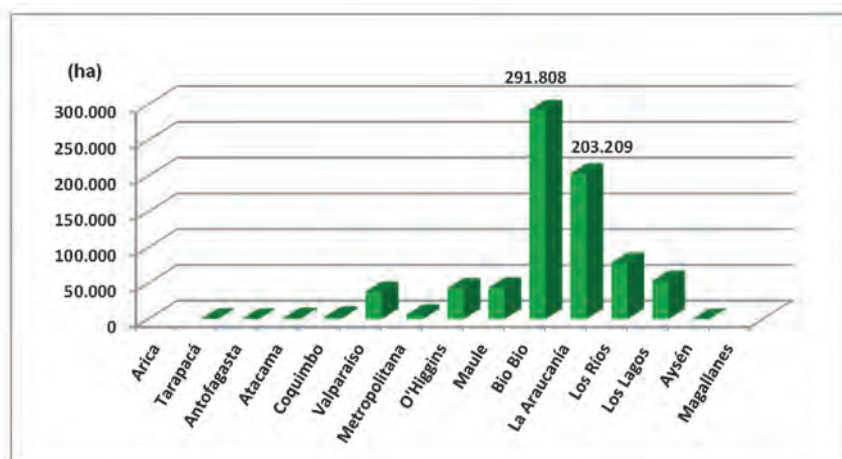


Figura N° 10
PLANTACIONES EUCALIPTOS SEGÚN REGIÓN 2011

A escala operacional, las plantaciones de eucaliptos en rotaciones cortas, de 11 a 16 años, para producción de madera para pulpa, establecidas con técnicas intensivas, que incluyen una preparación de suelos tan intensa como la profundidad y el nivel de compactación del suelo la hagan recomendable, fuerte control de competencia, en algunos casos fertilización inicial y sin intervenciones silvícolas posteriores, están creciendo según diferentes condiciones de sitio a ritmos de 13 a 26 m³/ha/año en el caso de *E. globulus* y de 14 a 33 m³/ha/año en el caso de *E. nitens* (Cabrera *et al.*, 2013).

La gama de especies hoy disponible para la ampliación y diversificación de las plantaciones forestales en el país es de especial importancia hacia el futuro. Como inicialmente se mencionó, existen en el país importantes extensiones de suelos forestales desarbolados hacia los cuales las plantaciones pueden ser ampliadas, en el mediano plazo la superficie de bosques plantados en el país puede ser duplicada y en el largo plazo tal vez triplicada o más.

Como se indicó anteriormente, en términos generales, las plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* se distribuyen entre las Regiones de Valparaíso y Los Lagos. Al norte y al sur de esta gran área las condiciones climáticas se hacen limitantes para su adecuado crecimiento por las reducidas precipitaciones y por bajas temperaturas, respectivamente. Dentro de esta gran área a su vez, existen diversas zonas que son marginales para su buen crecimiento, ejemplo de esto son el valle central desde la Región de Valparaíso hasta la parte norte de la Región del Bio Bio, por sus limitadas precipitaciones y prolongado período seco estival; sectores de precordillera andina, donde las menores temperaturas medias, frecuencia de heladas y eventuales nevadas limitan su supervivencia y crecimiento; y diversos sectores, principalmente del valle central de La Araucanía a Los Lagos, donde las bajas temperaturas son la limitante principal.

Dentro y fuera de la zona donde se ubican y desarrollan bien las plantaciones tradicionales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*, existen importantes superficies de suelos que pueden ser plantados, especialmente fuera.

Dentro de la gama de eucaliptos y de otras especies hay algunas que dado su crecimiento y las características de sus maderas pueden ser alternativas convenientes en el primer caso, dentro del área habitual de plantaciones, en especial si los objetivos productivos de las plantaciones no son los habituales para las especies tradicionales, de grandes volúmenes de madera para pulpa o aserrío, sino que madera aserrada de mayor valor, foliados, debobinados, u otros usos como combinaciones agroforestales, energía y otros.

No obstante, es en el segundo caso, fuera de área habitual de plantaciones, donde la gama de eucaliptos y otras especies es de mayor importancia, dado que entre ellas se puede encontrar las apropiadas para enfrentar condiciones de sitio adversas para las dos especies habitualmente empleadas.

La reciente masificación de *Eucalyptus nitens* en las plantaciones es un buen ejemplo de la incorporación de una especie para repoblar zonas que por bajas temperaturas resultan marginales para la especie normalmente usada, *Eucalyptus globulus*, ya que la primera, además de un excelente crecimiento, presenta mayor resistencia a frío que la segunda. Esta especie, presenta una menor densidad en su madera, pero esta se compensa con mayor crecimiento, y una limitada capacidad de retoñación para conformar un monte bajo para la segunda rotación, alternativa que, como antes se indicó, nos es actualmente del interés de las empresas. Esto ha motivado que se la haya empezado a emplear masivamente en las plantaciones desde Bio Bio a Los Lagos y que sea ya la tercera especie plantada en el país, con más de 200 mil hectáreas al 2011.

Es importante considerar también que el fenómeno de cambio climático global tendrá para el país consecuencias que pueden ser relativamente favorables en algunas regiones y relativamente desfavorables en otras.

Se espera un aumento general de las temperaturas medias y variaciones en los regímenes pluviométricos, y esto, en términos muy generales, implicaría que las condiciones de semiaridez de la zona central pueden extenderse hacia el sur, en especial por el valle central, acentuando las limitantes hídricas ya existentes y ampliándolas más al sur que en la actualidad. El aumento de las temperaturas puede ser positivo en sectores de precordillera andina de la zona sur y en la regiones australes favoreciendo el desarrollo de algunas especies o haciéndolo posible en zonas en que hoy no lo es.

No existe certeza respecto de la intensidad o magnitud de las variaciones climáticas que se avecinan, pero sin duda disponer de una buena variedad de especies forestales para emplear en las plantaciones constituirá una gran ventaja para enfrentarlas.

En consecuencia, se cumplen cabalmente en Chile las muy buenas razones señaladas por Bush (2011) por las cuales se puede requerir emplear más especies en las plantaciones, en especial de otros eucaliptos, muy en particular en lo que se refiere a enfrentar una menor disponibilidad de los mejores sitios y la presencia de factores limitantes para las especies habituales que, además, pueden variar o acentuarse por el cambio climático, y sin olvidar las otras razones comentadas por este autor, como una mayor resistencia a agentes patógenos, la generación de productos de mayor valor como madera aserrada y chapas, y servicios ambientales relacionados con captura de carbono, protección de suelos y generación de biomasa para energía.

Los programas de mejoramiento genético que INFOR y las empresas forestales están desarrollando en el país apuntan en la dirección indicada. Como se puede apreciar en los capítulos siguientes, se dispone de completas colecciones de procedencia-progenie para especies como *Eucalyptus camaldulensis*, *E. cladocalyx*, *E. globulus ssp globulus*, *E. delegatensis*, *E. nitens*, *E. regnans*, *E. sideroxylon*, *E. trichocarpa*, *E. viminalis* y *Corymbia maculata*; se han establecido áreas productoras de semillas en plantaciones anteriores con diferentes especies tanto de INFOR como de las empresas; han sido implementados huertos semilleros a partir de árboles *plus*; en la medida han avanzado los programas de mejoramiento se han establecido también huertos semilleros clonales; se trabaja en el desarrollo de clones e híbridos para mayor resistencia a sequía (*E. globulus* x *E. camaldulensis*; *E. globulus* x *E. tereticornis*) y a frío (*E. globulus* x *E. nitens*; *E. globulus* x *E. viminalis*); y están en marcha programas de mejoramiento para mejorar los rendimientos de pulpaje con *E. globulus* y *E. nitens*, y para madera sólida y chapas con *E. nitens*.

El desarrollo de estos programas busca aumentar la productividad de las especies para pulpa o madera sólida; aumentar la producción avanzando con nuevas plantaciones hacia áreas hoy marginales para las especies más habituales, por medio de material mejorado de estas o de la incorporación de otras especies; y disponer de una adecuada base genética para enfrentar las variaciones que imponga el cambio climático o la eventual aparición de plagas o enfermedades.

REFERENCIAS

Albert, Federico, 1909. Los 7 Árboles Forestales más Recomendables para el País. Santiago, Chile: Imprenta Cervantes, 1909. 45 p.

Barros, S.; Rojas, P.; Barros, D.; Navia, P.; Vita, A.; Toro, J. y Cogollor, G., 1979. Informe I. Situación Actual de los Programas de Introducción de Especies Forestales en Chile. Proyecto CONAF/PNUD/FAO/CHI -76 - 003. Instituto Forestal-Universidad de Chile. 386 p. Mapas y Anexos.

Barros, S.; Prado, J.A.; Elgueta, H.; Rojas, P.; Barros, D.; Navia, P.; Vita, A.; Cogollor, G.; Toro, J. y Caldentey, J., 1979a. Informe II. Áreas Cubiertas por Ensayos de Introducción de Especies y Ubicación de Nuevas Experiencias. Proyecto CONAF/PNUD/FAO/CHI - 76 - 003. Instituto Forestal-Universidad de Chile. 90 p. Mapas y Anexos.

Barros, S., 1993. Crecimiento Juvenil de Especies y Procedencias de *Eucalyptus*. Los Copihues. Provincia de Valdivia, X Región. En: Actas Simposio Los Eucaliptos en el Desarrollo Forestal de Chile. Pucón, Chile. 24 a 26 de Noviembre 1993. Instituto Forestal Chile. Barros, S., Prado, J.A. y Alvear, C. Eds,

Bay-Smith, T., 1965. Algunas Observaciones sobre Ensayos de Especies Forestales en la Provincia de Arauco.

Bush, David, 2011. Eucalypts for Planting: Trends in Testing and Utilization. CSIRO Plant Industry, Australian Tree Seed Centre. In: IUFRO Eucalypts, Porto Seguro, Bahía, Brazil. In: <http://www.ipef.br/eventos/2011/iufro.asp>

Cabrera, J., Martin, M., Rojas, Y., Avila, A., Muñoz, J.C., Bahamondez, C., Peña, O., Uribe, M. y Rojas, C., 2013. Disponibilidad de Madera de Plantaciones de Pino Radiata y Eucalipto (2010 – 2040). Informe técnico N° 194. Instituto Forestal, Chile.

Infante, P., Ipinza, R. y Prado, J. A., 1991. Bases para la Mejora Genética de Especies del Género *Eucalyptus* en Chile. En: Ciencia e Investigación Forestal Vol. 5 N°1. Barros S. (Ed.). Instituto Forestal, Santiago, Chile. pp 71 – 95.

INFOR, 2012. Anuario Forestal 2012. Boletín Estadístico N° 136. Instituto Forestal. Santiago, Chile.

INFOR, 2013. Anuario Forestal 2013. Boletín Estadístico N° 140. Instituto Forestal. Santiago, Chile.

Pilla, C., 1952. Informe sobre la Visita a las Dunas Fiscales de Chanco (Cauquenes). Santiago: FAO, 16 p.

Prado, J. A., Barros, S.; Wrann, J.; Rojas, P.; Barros, D. y Aguirre, S., 1986. Especies Forestales Exóticas de Interés Económico para Chile. Instituto Forestal - Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 168 p.

Prado, J. A. y Barros, S. (Eds), 1989. *Eucalyptus*. Principios de Silvicultura y Manejo. Instituto Forestal - Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 197 p.



4. EL RECURSO PLANTACIONES DE EUCALIPTOS EN CHILE Y SUS PROYECCIONES

Jorge Cabrera P.¹
Santiago Barros A.²
Marjorie Martín S.³
Alberto Ávila C.⁴
Gonzalo Paredes V.(†)⁵

INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se hace una revisión de la superficie de plantaciones de eucaliptos, su ubicación, su edad y sus propietarios de acuerdo con la información entregada por el inventario forestal continuo del Instituto Forestal (INFOR, 2012), en su parte actualización de plantaciones, y posteriormente se revisa el ritmo de plantación, el consumo de madera, la producción y la proyección de la participación de los eucaliptos en la actividad forestal del país, sobre la base de esta información y de antecedentes adicionales proporcionados por INFOR (2013) en su proyección de la disponibilidad de madera de plantaciones 2010 – 2040.

PLANTACIONES DE EUCALIPTOS EN CHILE

Superficie Total

De acuerdo con la cifras del Cuadro N° 6 del Capítulo 3, la superficie de plantaciones de eucaliptos, a diciembre del año 2011, es de 760.968 ha. Esta superficie representa el 31,8% de las plantaciones totales en el país (2.394.866 ha) y está compuesta en un 69,0% por *Eucalyptus globulus ssp globulus*, un 28,5% por *Eucalyptus nitens* y un 2,5% por otras especies del género. La distribución de las plantaciones de eucaliptos según regiones se indica en el Cuadro N° 1 y Figura N° 1.

1 Ingeniero Forestal, Universidad Austral de Chile, Dr (c). Gerente Técnico. Instituto Forestal jcabrera@infor.cl

2 Ingeniero Forestal, Universidad de Chile. Dirección Ejecutiva. Instituto Forestal, sbarros@infor.cl

3 Ingeniera Forestal, Dr (c). Investigadora Sede Los Ríos. Instituto Forestal mmartin@infor.cl

4 Ingeniero Forestal. Investigador Sede Bio Bio. Instituto Forestal, aavila@infor.cl

5 Ingeniero Forestal, Dr. Universidad Austral de Chile

Cuadro N° 1
SUPERFICIE PLANTACIONES DE EUCALIPTOS POR REGIÓN (2011)

Region	Total	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus nitens</i>	<i>Eucalyptus spp</i>
(ha)				
Arica				
Tarapacá	309	309		
Antofagasta	2	2		
Atacama	1.325	1.325		
Coquimbo	2.812	2.718		94
Valparaíso	38.037	37.675		362
Metropolitana	5.834	5.738		96
O'Higgins	42.758	42.743	14	1
Maule	43.511	41.934	1.502	75
Bío Bío	291.808	208.705	76.870	6.232
La Araucanía	203.209	143.393	55.844	3.972
Los Ríos	78.298	20.835	51.689	5.775
Los Lagos	53.055	19.788	30.905	2.362
Aysén	10		7	3
Magallanes				
Total	760.968	525.166	216.830	18.972

(Fuente: Elaboración propia en base a INFOR, 2012)

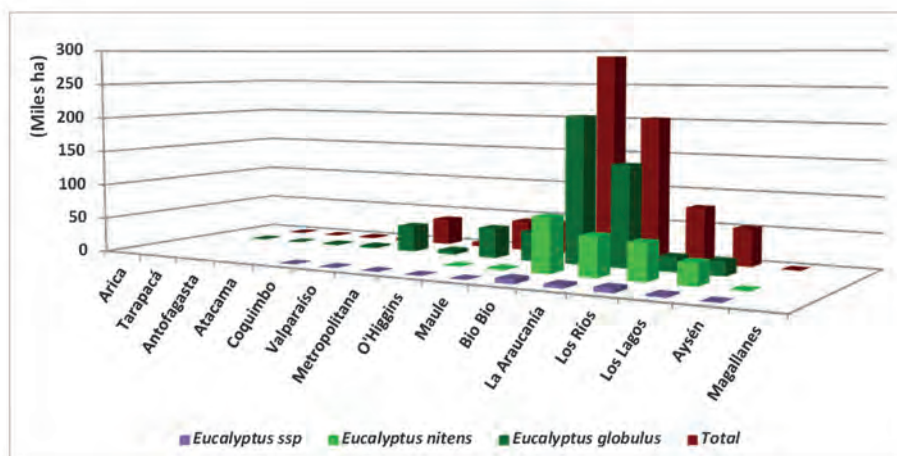


Figura N° 1
SUPERFICIE PLANTACIONES DE EUCALIPTOS POR REGIÓN

Se puede apreciar una fuerte concentración de las plantaciones de eucaliptos en las Regiones de Bío Bío a Los Lagos, que concentran más del 82% de la superficie de estas, en especial Bío Bío con algo más del 38%. *Eucalyptus nitens* predomina en Los Ríos y Los Lagos donde son más frecuentes los sitios donde se requiere su mayor resistencia a frío.

Superficie por Edad y Tipo de Propietario

La información correspondiente a edad de las plantaciones y tipo de propietarios de estas incluye solo las especies principales, *Eucalyptus globulus* y *E. nitens*, no considera las regiones del norte (Arica a Atacama) y tampoco Aysén por el sur. Esto es una superficie total entre las Regiones de Coquimbo y Los Lagos de 740.360 ha (Cuadro N°2 y Figura N° 2).

Cuadro N° 2
SUPERFICIE PLANTACIONES DE EUCALIPTOS POR EDAD Y TIPO
PROPIETARIOS (2011)

<i>Eucalyptus globulus</i> (ha)					
Edad	EG	EM	MP	PP	Total
0 - 4	37.763	27.935	18.843	57.346	141.887
5 - 9	54.073	25.517	28.382	123.322	231.294
10 - 14	36.473	12.303	12.633	45.611	107.020
15 - 19	6.481	1.898	4.133	16.926	29.437
20 - 24	3.600	411	1.561	5.218	10.790
> 24	1.010	14	233	1.845	3.103
Subtotal	139.400	68.078	65.785	250.267	523.530
<i>Eucalyptus nitens</i>					
0 - 4	54.828	9.321	6.128	13.617	83.894
5 - 9	16.765	8.717	8.453	16.282	50.217
10 - 14	29.509	8.216	2.045	9.222	48.992
15 - 19	23.238	2.309	2.374	3.699	31.620
20 - 24	1.418	267	136	137	1.958
> 24	52	66	20	10	148
Subtotal	125.810	28.896	19.156	42.967	216.830
Total	265.210	96.974	84.941	293.234	740.360

EG: Empresas grandes > 30.000 ha EM: Empresas medianas > 5.000 ha
 MP: Medianos propietarios > 200 ha PP: Pequeños propietarios < 200 ha
 (Fuente: INFOR, 2013)

Se puede apreciar que gran parte de las plantaciones se encuentra en manos de empresas medianas y de pequeños y medianos propietarios (64,2%), destacando los pequeños propietarios que disponen de casi el 40% del total (47% de la superficie de *E. globulus* y 20% de aquella de *E. nitens*).

Respecto de la edad de las plantaciones, estas son muy mayoritariamente de 14 años y menos, dado que, como antes se ha mencionado, el principal destino de estas es la producción de pulpa en rotaciones cortas, de 10 a 14 años (Cuadro N° 2 y Figura N° 2).

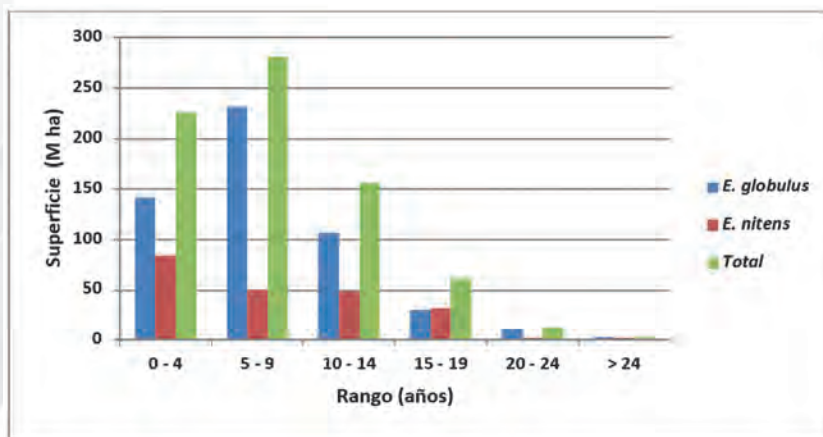


Figura N° 2
EDAD DE LAS PLANTACIONES DE EUCALIPTOS (2011)

Tasa de Plantación Anual

Como se vio en el Capítulo 3, en 1980 existían unas 33 mil hectáreas de plantaciones de eucaliptos, en 1985 eran unas 50 mil y en 1990 ya algo más de 100 mil. Desde 1995 se ha estado plantando a una tasa anual media cercana a las 40 mil hectáreas y en 17 años (1995 a 2011) se ha plantado una superficie de 658 mil hectáreas (Cuadro N° 3), 297 mil hectáreas de las cuales corresponden a reposición (reforestación) de las superficies cosechadas para abastecer la capacidad industrial de producción de pulpa química de eucalipto, que se ha venido ampliando desde principios de los años 90 del siglo pasado.

Cuadro N° 3
TASA PLANTACIÓN ANUAL FORESTACIÓN - REFORESTACIÓN

Año	Forestación	Reforestación	Total
(ha)			
1995	24.126	5.428	29.554
1996	12.033	6.105	18.138
1997	11.444	5.698	17.042
1998	14.044	8.754	22.798
1999	13.247	20.306	33.553
2000	23.173	13.607	36.780
2001	22.739	15.806	38.545
2002	19.689	16.785	36.474
2003	31.029	18.623	49.652
2004	32.657	19.374	52.031
2005	40.693	15.530	56.223
2006	42.256	18.754	61.010
2007	24.972	18.703	43.675
2008	11.433	23.073	34.506
2009	11.575	23.902	35.477
2010	15.243	35.780	51.023
2011	10.500	31.265	41.765
Total	360.853	297.393	658.246

(Fuente: INFOR, 2012)

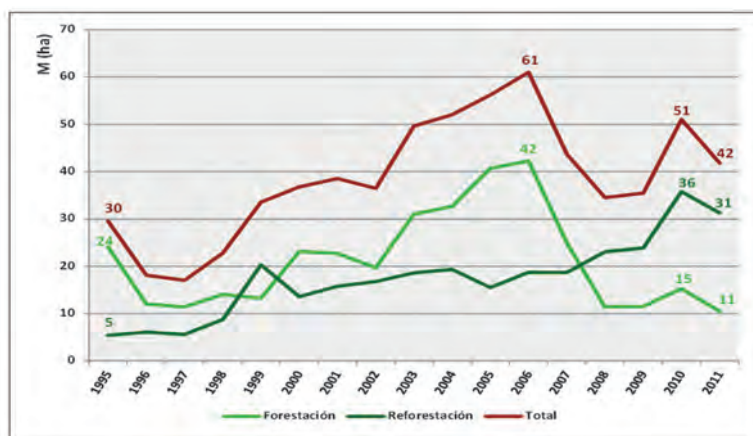


Figura N° 3
TASA PLANTACIÓN ANUAL FORESTACIÓN - REFORESTACIÓN

La reforestación (obligatoria por ley) aumenta durante el período dado el consumo industrial creciente ya mencionado y la forestación en tanto crece acompañando este desarrollo, pero muestra variaciones dadas por la vigencia o expectativas de vigencia de la normativa de fomento a las plantaciones (DL N° 701 de 1974).

Es así como al inicio del período (Figura N° 3) la tasa de forestación ha bajado debido a la expiración de los 20 años de vigencia considerados inicialmente en esta normativa de fomento, la cual en 1996 es prorrogada y las tasas suben considerablemente hasta que en 2007 registran un máximo que incluso supera a las registradas por pino radiata. Posteriormente, declinan debido a que nuevamente expira la normativa, que algo después es prorrogada una vez más y las tasas se recuperan.

En 2012 expiró la normativa y no ha sido extendida, pero se encuentra en trámite legislativo una nueva ley de fomento a la forestación, que ampliaría los objetivos de esta hacia dendroenergía, servicios ambientales y otros fines, y estaría fuertemente enfocada en pequeños y medianos propietarios.

CONSUMO

La producción de pulpa de madera constituye el principal rubro de la industria forestal del país, es el mayor destino de la corta anual de madera para fines industriales y también representa el mayor monto en exportaciones forestales.

En el año 2011 el consumo total de madera para pulpa es de 15,6 millones de metros cúbicos y las exportaciones US\$ FOB 2.895 millones solo en pulpa química, lo que representa el 39,8% de la corta total y el 49% de las exportaciones del año.

El consumo principal de madera de eucaliptos lo representa la pulpa química con, 6,2 millones de metros cúbicos, pero existe un consumo importante, casi equivalente, dado por la industria de astillas, con 5,7 millones de metros cúbicos, producto que en un 90% es destinado a mercados de exportación (Cuadro N° 4 y Figura N° 4).

Los restantes productos a que se destina madera de eucaliptos, como madera aserrada, tableros y otros, son aún de relevancia marginal, aunque tableros y chapas tienen cierto crecimiento en los último 4 ó 5 años. La exportación de trozas para pulpa tuvo cierta importancia a fines del siglo pasado y primeros años del presente, pero posteriormente casi ha desaparecido.

Cuadro N° 4
CONSUMO MADERA EN TROZAS EUCALIPTOS SEGÚN PRODUCTO 2011

Producto	Consumo (Mm³)
Pulpa	6.203,5
Madera Aserrada	4,7
Tableros	273,7
Trozos Aserrables Ex.	1,4
Astillas	5.721,8
Postes y Polines	4,0
Total	12.209,1

(Fuente: INFOR, 2012)

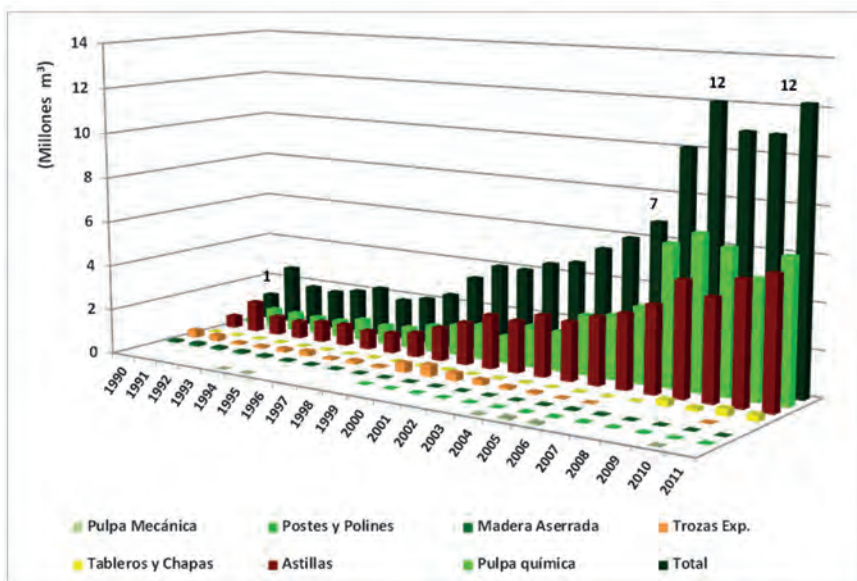


Figura N° 4
CONSUMO MADERA EN TROZAS EUCALIPTOS SEGÚN PRODUCTO Y AÑO
1990 - 2011

PRODUCCIÓN Y CAPACIDAD INSTALADA

Producción

La industria de pulpa de madera inicia su desarrollo a mediados de los años 50 del siglo pasado y registra un sostenido aumento hasta la actualidad sobre la base de las plantaciones de pino radiata.

Los eucaliptos empiezan a aparecer en las estadísticas de producción de pulpa a inicios de los años 90 del siglo pasado manteniendo también un sostenido aumento hasta ahora.

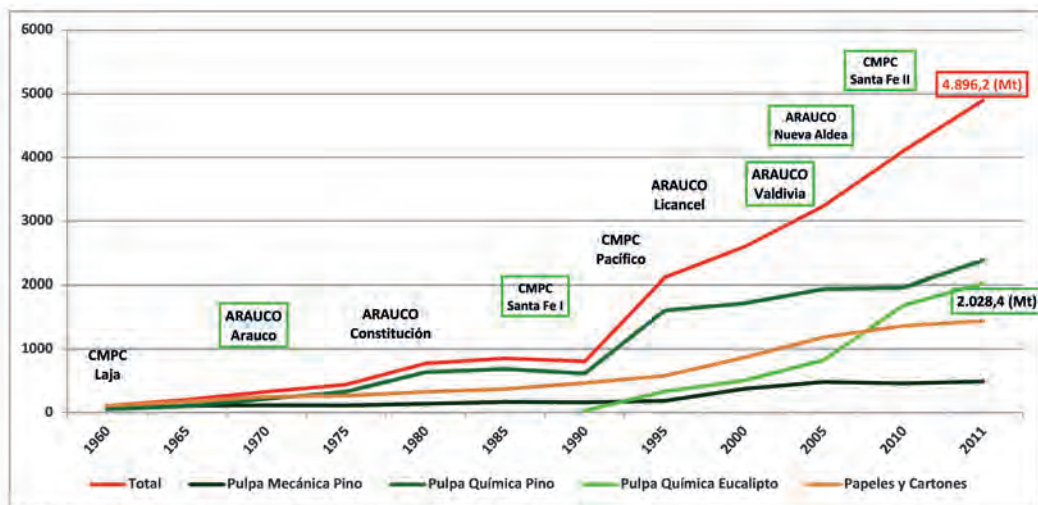
Hoy la producción de pulpa química de eucaliptos ya supera el 40% de la producción total de pulpa (Cuadro N° 5 y Figura N° 5), con un consumo total de madera en trozas de 6,2 millones de metros cúbicos y una producción de 2 millones de toneladas de pulpa química en 2011.

Estos incrementos responden evidentemente a las ampliaciones de plantas de celulosa existentes y a la implementación de nuevas plantas (Figura N° 5).

Cuadro N° 5
EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PULPA 1960 - 2011

Año	Total	Pulpa Mecánica Pino	Pulpa Química Pino	Pulpa Química Eucalipto	Papeles y Cartones
(Mt)					
1960	104,9	51,8	53,1		105,8
1965	199,0	102,4	96,6		170,6
1970	325,5	114,8	210,7		246,8
1975	435,8	110,0	325,8		265,5
1980	770,7	136,7	634,0		324,4
1985	848,9	166,8	682,1		369,4
1990	804,1	159,8	614,3	30,0	462,0
1995	2.112,4	183,8	1.600,0	328,6	573,8
2000	2.591,9	372,0	1.716,5	503,4	860,8
2005	3.237,2	479,0	1.936,5	821,7	1.183,6
2010	4.102,2	458,2	1.959,6	1.684,4	1.361,8
2011	4.896,2	485,1	2.382,7	2.028,4	1.437,3

(Fuente: INFOR, 2012)



CMPC: Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones ARAUCO: Celulosa Arauco

Figura N° 5
EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PULPA Y DE LA INDUSTRIA

Capacidad Instalada Industria Pulpa Química Eucaliptos

La capacidad instalada actual de la industria de pulpa química de eucaliptos alcanza a 2,4 millones de toneladas y la producción en 2011, con algo más de 2 millones de toneladas, se acerca ya a esta capacidad productiva (Cuadros N° 6 y N° 7 y Figura N° 6).

La disponibilidad actual de madera de eucalipto es amplia, como se refleja en el gran volumen que se está destinando a astillas que va a mercados de exportación, el cual si fuese reorientado a la producción de pulpa química excedería con creces la actual capacidad instalada en este rubro.

Independientemente de las condiciones de mercado que estén sustentando la exportación de astillas, que se han mantenido en permanente crecimiento durante los últimos

20 años y que se ha más que duplicado en los últimos 10 años, sin duda esta disponibilidad de madera puede promover nuevas ampliaciones de las plantas de celulosa existentes o la instalación de nuevas plantas, con la consiguiente incorporación de mayor valor a la producción.

Cuadro N° 6
PLANTAS DE CELULOSA Y CAPACIDAD INSTALADA

EMPRESA	PLANTA	REGIÓN	CAPACIDAD	PINO	EUCALIPTO
			(M t)		
Pulpa Química			5.145	2.745	2.400
ARAUCO	Licancel	Maule	150	150	
	Constitución	Maule	355	355	
	Nueva Aldea (2006)	Bio Bio	515	515	
			515		515
	Arauco (1971)	Bio Bio	500	500	
			290		290
	Valdivia (2004)	Los Rios	275	275	
			275		275
Subtotal			2.875	1795	1080
CMPC	Santa Fe (1991)	Bio Bio	380		380
	Santa Fe II (2007)	Bio Bio	940		940
	Pacífico	Bio Bio	500	500	
	Laja	Bio Bio	450	450	
Subtotal			2.270	950	1320
Pulpa Mecánica			551		
TOTAL			5.696		

(Fuente: Elaboración propia en base a Celulosa Arauco, 2013 ; CMPC, 2013 y ATPC, 2011)

Cuadro N° 7
EVOLUCIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA
PULPA QUÍMICA EUCALIPTOS

Año	Producción	Capacidad Instalada
	(Mt)	
1990	30	290
1995	329	670
2000	503	670
2005	822	945
2010	1.684	2.400
2011	2.028	2.400

(Fuente: INFOR, 2012; CMPC, 2013; Arauco, 2013; ATPC, 2011)

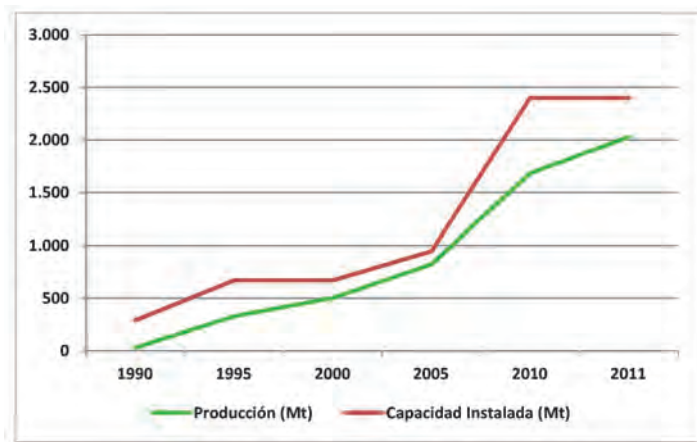


Figura N° 6
EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE PULPA QUÍMICA DE EUCALIPTO
Y DE LA CAPACIDAD INSTALADA INDUSTRIAL

PROYECCIÓN

Además de las permanentes actualizaciones de inventarios, tanto en bosques nativos como en plantaciones forestales, el Instituto Forestal realiza periódicas proyecciones de la disponibilidad de madera en las plantaciones. La metodología para esto toma como base las superficies de inventario y proyecta la disponibilidad de madera, normalmente a 30 años, mediante diversas estimaciones de plantación, crecimiento, manejo, consumo, pérdidas por incendios y otras variables para el período proyectado, conformando así escenarios alternativos para las proyecciones (INFOR, 1999; 2005; 2007; 2013).

Disponibilidad de Madera

La última de estas proyecciones (INFOR, 2013), en un escenario probable, en el que se supone la continuación de la legislación de fomento a las plantaciones forestales, mediante la promulgación próxima de una nueva ley de fomento, actualmente en trámite legislativo, y ciertos incrementos de rendimientos volumétricos, originados en ganancias genética obtenidas en los programas de mejoramiento genético que están desarrollando INFOR y las principales empresas forestales desde hace ya varios años, arroja para las plantaciones de eucaliptos las disponibilidades futuras de madera que se indican en el Cuadro N° 8 y en la Figura N° 7.

Cuadro N° 8
PROYECCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE MADERA DE PLANTACIONES DE EUCALIPTOS
POR AÑO Y ESPECIE 2011 - 2040⁶

Año	<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus nitens</i>	Total
	(Mm³)		
2011	6.825	5.306	12.131
2012	6.825	5.960	12.785
2013	7.185	6.327	13.512
2014	7.235	6.785	14.019
2015	7.302	7.026	14.328
2016	12.582	7.026	19.608
2017	12.582	7.026	19.608
2018	12.582	7.026	19.608
2019	12.582	7.026	19.608
2020	12.582	7.026	19.608
2021	12.582	7.026	19.608
2022	12.582	7.549	20.131
2023	12.582	9.362	21.944
2024	12.582	9.362	21.944
2025	12.582	9.362	21.944
2026	12.582	9.362	21.944
2027	12.582	9.362	21.944
2028	12.582	9.362	21.944
2029	12.582	9.362	21.944
2030	12.582	9.362	21.944
2031	12.582	9.362	21.944
2032	12.582	9.362	21.944
2033	12.582	9.362	21.944
2034	12.582	9.362	21.944
2035	12.582	9.362	21.944
2036	12.582	9.362	21.944
2037	12.582	9.362	21.944
2038	12.582	9.362	21.944
2039	12.582	9.362	21.944
2040	12.582	9.362	21.944

(Fuente: INFOR, 2013)

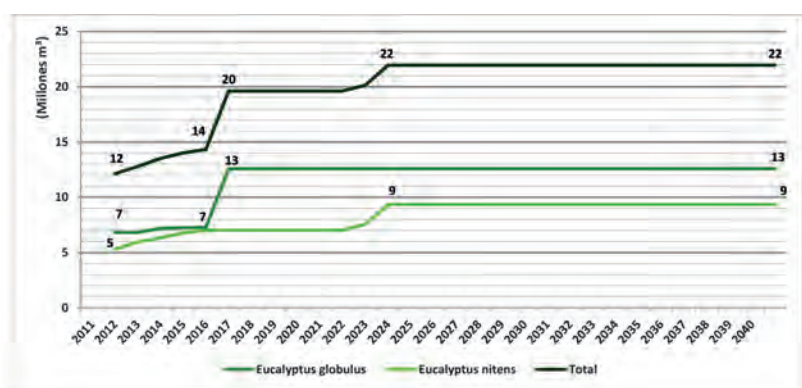


Figura N° 7
PROYECCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE MADERA DE PLANTACIONES DE EUCALIPTOS
POR AÑO Y ESPECIE 2011 - 2040⁶

⁶ Proyección basada en la actualización de superficies de plantaciones a diciembre 2010 que era la disponible al iniciarse el estudio.

Se puede observar que bajo el escenario de proyección indicado (Cuadro N° 8) la disponibilidad anual de madera de eucaliptos llegaría a casi 20 millones de metros cúbicos en el año 2016, estabilizándose en esta cifra hasta el año 2023 cuando subiría a cerca de 22 millones de metros cúbicos, para estabilizarse nuevamente hasta el fin del horizonte de proyección (2040).

Eucalyptus globulus incrementaría su oferta a 12,6 millones de metros cúbicos en el año 2016 para mantenerse estable esta hasta 2040.

Eucalyptus nitens en tanto, subiría a 7 millones de metros cúbicos en 2015, para aumentar nuevamente su oferta en 2023 a 9,4 millones de metros cúbicos y mantener esta cifra estable hasta el fin del horizonte de proyección.

Productos

Las disponibilidades proyectadas bajo el escenario indicado permitirían incrementar fuertemente el consumo anual de madera hasta casi duplicarlo a partir del año 2023, lo que da un amplio margen para ampliaciones industriales.

En el año 2011 el consumo está representado en un 98% por pulpa química y astillas, 51% y 47%, respectivamente, dejando solo un 2% para otros productos, principalmente tableros y chapas.

De mantenerse este nivel de participación, el aumento de consumo a 22 millones de metros cúbicos exigiría aumentar la capacidad industrial, expresada en capacidad de proceso ($\text{m}^3/\text{año}$), a:

- 11,2 millones de m^3 para pulpa química
- 10,3 millones de m^3 para astillas
- 0,4 millones de m^3 para otros productos

Incrementar la capacidad instalada para producción de astillas representa inversiones comparativamente irrelevantes, no así para tableros y chapas o madera aserrada, entre los otros productos, que requieren mayores inversiones. Para pulpa química en tanto, se requieren inversiones de importancia.

En el Cuadro N° 9 y Figura N° 8 se entrega una visión general de la evolución del consumo y producción por productos, desde 1990; se señala la capacidad instalada de producción de pulpa química y la proyección de la disponibilidad de madera según el escenario ya mencionado, que supone la vigencia de la ley de fomento a las plantaciones y ciertos incrementos de rendimiento en madera dados por mejoramiento genético (3)

En el cuadro y la figura se incorporan también las disponibilidades de madera obtenidas según dos escenarios adicionales, un escenario base, más conservador, que no considera los supuestos indicados (1), y un escenario intermedio, que contempla la vigencia de la ley de fomento y no así los mayores rendimientos originados en los programas de mejoramiento genético (2).

Cuadro N° 9
EVOLUCIÓN CONSUMO Y PRODUCCIÓN POR PRODUCTOS, CAPACIDAD INSTALADA PULPA QUÍMICA Y
PROYECCIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE MADERA SEGÚN ESCENARIOS

AÑO	PULPA QUÍMICA				PULPA MECÁNICA	MADERA ASERRADA		TABLEROS Y CHAPAS	TROZAS EXPORT.		ASTILLAS	POSTES Y POLINES	CONSUMO TOTAL	PROYECC. DISPONIB.		
	Consumo	Capacidad Instalada	Producción		Consumo	Consumo	Producción		ASERRIO	PULPA				1	2	3
	(Mm³)	(Mt)	(Mm³) (t)	(Mt)	(Mm³)	(Mm³)			Consumo				(Mm³)	(Mm³)		
1990	158	290	887	30		87	41	18		344	543		1.150			
1991	810	670	2.050	156		130	61	25		269	1.377		2.610			
1992	768	670	2.050	276		114	54	19		82	837		1.820			
1993	741	670	2.050	287		104	49	20		93	776		1.734			
1994	740	670	2.050	316	2	87	41	24	6	151	921		1.930			
1995	951	670	2.050	329	2	53	25	23		224	962		2.214			
1996	837	670	2.050	332		44	21	19		73	826		1.799			
1997	921	670	2.060	325		33	15	22		147	903		2.025			
1998	1.175	670	2.050	442		22	10	21		70	1.080		2.368			
1999	1.360	670	2.050	440		19	9	17		413	1.490	8	3.306			
2000	1.549	670	2.060	503		22	10	18	1	505	1.889	3	3.987			
2001	1.205	670	2.050	452		17	8	14		347	2.366	6	3.975			
2002	1.836	670	2.050	553		14	7	11		234	2.290	5	4.389			
2003	1.738	670	2.050	536		12	6	10		121	2.714	2	4.586			
2004	2.641	945	2.892	781	6	11	5	7		81	2.580	5	5.341			
2005	2.805	945	2.892	822	92	25	12	10		16	2.989	9	5.947			
2006	3.339	1.460	4.468	952	83	33	18	1		16	3.282	15	6.770			
2007	6.188	2.400	7.344	1.828		26	13	2			3.824	18	10.058			
2008	6.749	2.400	7.344	2.050		7	4	288			5.008	6	12.055			
2009	6.290	2.400	7.344	2.018		7	4	153	1		4.455	4	10.910			
2010	5.147	2.400	7.344	1.684	22	6	3	329	2	24	5.347	3	10.880			
2011	6.204	2.400	7.344	2.028		5	3	274	1		5.722	4	12.209			
2012														12.785	12.785	12.785
2013														13.512	13.512	13.512
2014														14.019	14.020	14.020
2015														14.329	14.328	14.328
2016														17.634	18.637	19.608
2017														17.634	18.637	19.608
2018														17.634	18.637	19.608
2019														17.634	18.637	19.608
2020														17.634	18.637	19.608
2021														17.968	18.637	19.608
2022														17.968	19.482	20.131
2023														17.968	19.949	21.944
2024														17.968	19.949	21.944
2025														17.968	19.949	21.944

(1). Relación Insumo/producto 3,06 m³/t

(Fuente: Elaboración propia en base a INFOR, 2012; INFOR, 2013)

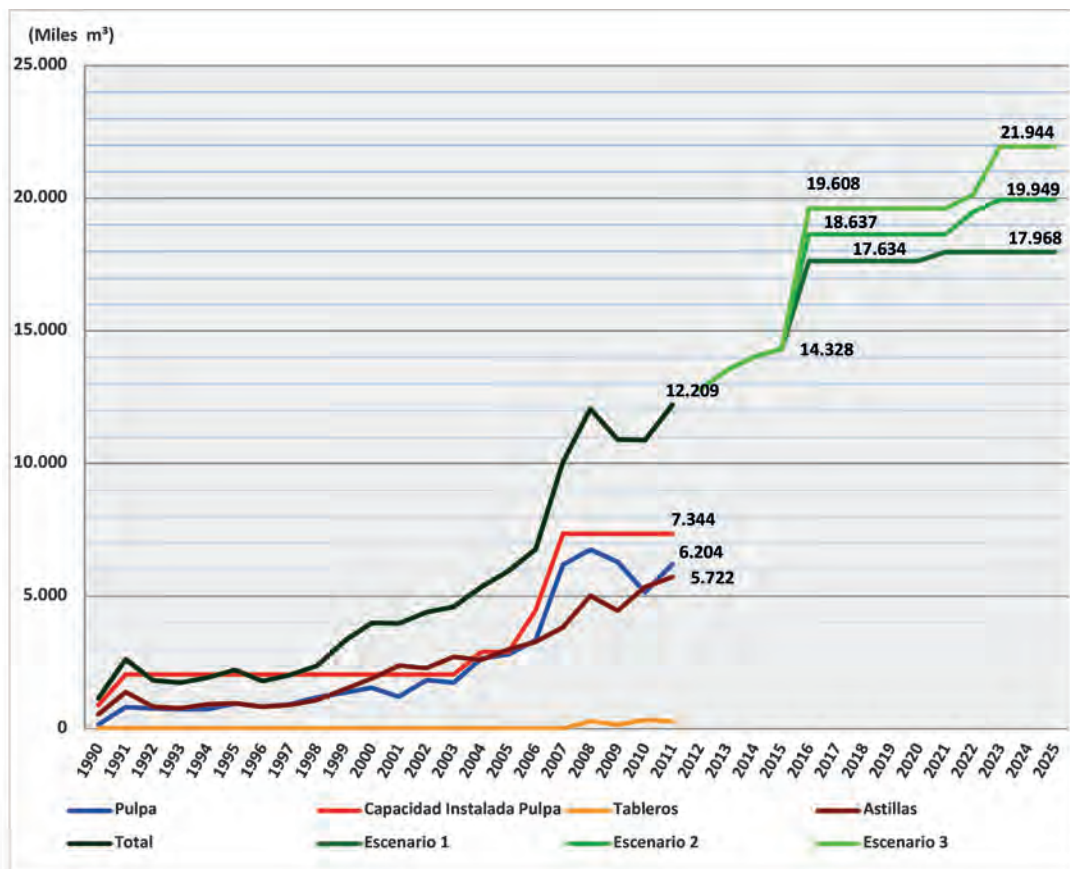


Figura N° 8
CONSUMO SEGÚN PRODUCTOS, CAPACIDAD INSTALADA PULPA QUÍMICA Y PROYECCIÓN
DISPONIBILIDAD MADERA SEGÚN ESCENARIOS

Perspectivas

Manteniendo el supuesto que el consumo se mantiene con la participación proporcional por productos antes indicada, en el caso de pulpa química 51%, y asumiendo que se aprovecha íntegramente la disponibilidad de madera, en solo 3 años (2016) la actual capacidad instalada de producción de pulpa química de eucaliptos (2,4 millones de toneladas de producto o 7,3 millones de metros cúbicos de insumo) estará al límite y al año siguiente será ampliamente superada por la disponibilidad de madera, cualquiera sea el escenario de proyección que se cumpla, y esta tendría que ser ampliada a al menos unos 3 millones de toneladas para el año 2017. Esto supone que la producción y exportación de astillas se mantiene al ritmo actual, caso contrario el desafío para la industria de pulpa prácticamente se duplica.

La industria forestal chilena tradicionalmente ha ampliado su capacidad instalada en la medida que aumenta la disponibilidad del recurso madera, razón por la que el incremento de la capacidad instalada de pulpa química de eucalipto muy probablemente se hará efectivo siguiendo la oferta de madera.

No es tan predecible en tanto, el futuro del mercado de astillas, pese a que se mantiene

en permanente crecimiento desde 1990. Además de variaciones de los mercados externos, hay factores que pueden afectar a este rubro. Uno de ellos es la probable consolidación de una oferta de madera pulpable o astillas, también de fibra corta, procedente de bosques nativos que, sometidos a manejo como resultado de los incentivos estatales contemplados en la ley promulgada en el año 2008 para estos efectos, podrían generar importantes volúmenes de madera delgada proveniente principalmente de raleos en renovales o bosques de segundo crecimiento.

Hay otros factores que podrían afectar el escenario actual del mercado de la madera de eucaliptos y la participación proporcional de los productos en este, entre estos se cuentan mayores ampliaciones de la capacidad instalada para pulpa química, un mayor desarrollo en áreas como madera aserrada y tableros y chapas, e incluso la consolidación de un mercado ya emergente como es el de la dendroenergía.

No es improbable una ampliación de la capacidad instalada para pulpa química, más allá de los 3 millones de toneladas anuales antes indicados, revirtiendo la exportación de astillas hacia un producto de mayor valor agregado.

Tampoco es improbable un mayor desarrollo en áreas como madera aserrada, tableros y chapas, también productos de mayor valor, principalmente sobre la base del incremento en la oferta de madera de *Eucalyptus nitens*, especie que tiene menor rendimiento que *Eucalyptus globulus* por unidad de volumen de madera en el proceso de producción de pulpa y respecto de la cual se están desarrollando investigaciones orientadas a un manejo silvícola en rotaciones más largas, que incluyen raleos y podas, para la producción de trozas para aserrío y debobinado o foliado, al mejoramiento genético con similares fines y a los procesos de secado y transformación posterior, para reducir tensiones de crecimiento en la madera que generan pérdidas por presencia de grietas en los extremos de las trozas. Para este tipo de productos es probable también que se incorporen otras especies del género, como *Eucalyptus regnans*, *E. delegatensis* y otras, como ya está ocurriendo con la primera en la Región del Bio Bio.

En el área de la dendroenergía en tanto, dadas la creciente demanda energética para el consumo en las áreas industrial, habitacional y de servicios, y la también creciente contaminación atmosférica de los grandes centros urbanos, existe cada día una mayor presión de la sociedad por el uso de energías más limpias que aquellas derivadas del petróleo y, como en otros países, hay ya una política de fomento orientada a promover un mayor uso de las llamadas energías renovables no convencionales, como la solar, la eólica, la de centrales hidroeléctricas de paso y la derivada de biomasa combustible. Respecto de esta última, existe ya un desarrollo y las grandes empresas forestales están empleando los residuos, principalmente de la industria de transformación primaria de la madera, en la producción de energía mediante procesos de cogeneración, cubriendo sus propias demandas energéticas y entregando excedentes de energía eléctrica al sistema interconectado de distribución del país.

Resta promover un aprovechamiento similar de los residuos de la industria de transformación secundaria de la madera y de aquellos de la silvicultura, e incorporar también a las pymes. No obstante que la utilización de residuos de la silvicultura y de las pymes representa problemas de acopio y de transporte que pueden hacer inviable esta alternativa.

Sin embargo, estos esfuerzos en materia de energía son muy positivos, pero insuficientes ante el acelerado crecimiento de la demanda energética, razón por la que también se está investigando y hay ya algunas iniciativas en torno a plantaciones con fines energético, para lo cual los eucaliptos son muy adecuados por su rápido crecimiento, la alta densidad de su madera y el elevado poder calorífico de esta. Situación que podría conducir a que parte de las plantaciones hoy destinadas a la producción de pulpa sean reorientadas a energía y también al establecimiento de nuevas plantaciones, de alta densidad y muy corta rotación, para estos fines.

REFERENCIAS

ATCP, 2011. Presentación Industria de Celulosa en Chile. Asociación Técnica de la Celulosa y el Papel, Chile. En: 5° ICEP International Colloquium on Eucalypts Pulp. Mayo 2011. Porto Seguro, BA, Brasil

Celulosa Arauco, 2013. Celulosa Arauco. En línea www.arauco.cl (Consulta Agosto 2013)

CMPC, 2013. Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones. En línea www.cmpc.cl (Consulta agosto 2013)

INFOR, 1999. Disponibilidad de Madera de Plantaciones de Pino Radiata en Chile. 1998 – 2007. Informe Técnico N° 142. INFOR – CORFO. 45 p.

INFOR, 2005. Disponibilidad de Madera de Plantaciones de Pino Radiata en Chile. 2003 – 2032. Informe Técnico N° 173. INFOR – MINAGRI. 103 p.

INFOR, 2007. Disponibilidad de Madera de Eucaliptos en Chile 2016 – 2025. Informe Técnico N° 173. INFOR – MINAGRI. 57 p.

INFOR, 2012. Anuario Forestal 2012. Boletín Estadístico N° 136. INFOR – MINAGRI. 138 p.

INFOR, 2013. Proyección de la Disponibilidad de Madera de Plantaciones de Pino Radiata y Eucalipto. 2010 – 2040. Informe técnico N° 194. INFOR – MINAGRI.





5. ASPECTOS FITOSANITARIOS EN EUCALIPTOS

Osvaldo Ramírez G.¹

INTRODUCCIÓN

Los eucaliptos, como todos los seres vivos, suelen ser afectados por plagas y enfermedades que pueden reducir el valor para el hombre de las plantaciones y de sus productos, pero que en muy pocas ocasiones amenazan la supervivencia de estas, excepto cuando provocan desajustes del equilibrio del ecosistema, situación en la que estos agentes dañinos pueden asumir un papel de gran agresividad.

Las plagas y enfermedades pueden ser controladas por diferentes medios; silviculturales, químicos y biológicos, prefiriéndose estos últimos que emplean enemigos naturales de la plaga o del patógeno involucrado.

En el mundo globalizado actual ya no son suficientes las barreras naturales que impiden el movimiento de las plagas y enfermedades de un continente a otro o de un país a otro, razón por la que aumenta el riesgo de introducción de nuevos agentes fitosanitarios y para esto es conveniente estar preparados y con la información necesaria para hacerles frente en forma eficaz y eficiente.

Dada la importancia del género eucalipto en Chile, que alcanza ya una superficie de más de 700 mil hectáreas plantadas en el país, es relevante conocer los problemas fitosanitarios presentes y potenciales, sus hospedantes, sus daños, su distribución, sus formas de detección y su control.

En este capítulo se hace una reseña de los principales problemas fitosanitarios que afectan o pueden afectar a los eucaliptos, los actualmente presentes en el país y las amenazas de aquellos nuevos agentes que potencialmente puedan ingresar al territorio nacional, con el fin de tener la información necesaria para enfrentarlos y definir las medidas preventivas o de control para evitar o disminuir sus eventuales daños.

PRINCIPALES PLAGAS Y ENFERMEDADES PRESENTES EN EL PAÍS

Plagas

- ***Gonipterus platensis* (Ex *Gonipterus scutellatus*) Gorgojo**

Descripción general, origen y presencia: Corresponde a un escarabajo de forma robusta, de color castaño rojizo a grisáceo, cuyo origen es el Sudeste de Australia y que se encuentra presente en Europa, África, Norteamérica, Oceanía y Sudamérica. En Chile está presente desde la Región de Valparaíso al norte de la Región de Los Lagos.

Hospedantes principales: *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. viminalis*, *E. grandis*, *E. camaldulensis*, *E. dunnii*, *E. smithii*, *E. saligna*.

¹ Ingeniero Agrónomo. Universidad Católica de Chile. Gerente Controladora de Plagas Forestales S.A. oramirez@cpf.cl.

Formas de detección: Su presencia se reconoce por mordeduras en los márgenes de la hoja provocada por adultos. Raspaduras en el limbo de las hojas provocada por las larvas. (INFOR, 1999; Ramirez y De Ferrari, 1995).

Daños: Las larvas recién eclosionadas atraviesan la hoja y salen por la superficie opuesta. El adulto se alimenta de los bordes de las hojas. Ambos daños causan pérdida de incremento volumétrico por disminución de la fotosíntesis y pérdida de madera por mortalidad de árboles.

Control: Biológico con parásito de huevos (*Anaphes nitens*), químico con productos del tipo Piretroides, mecánico a través de aradura y uso de rastra.



Figura N° 1
GORGOJO ADULTO

- ***Phoracantha* spp. Taladrador**

Descripción general, origen y presencia: Corresponde a un insecto con antenas largas, de color café claro, cuyo origen es Australia, y que se encuentra presente en Oceanía; África; Europa; Norteamérica y prácticamente toda Sudamérica. En Chile se encuentra presente desde la Región de Atacama hasta la Región de Los Lagos.

Hospedantes principales: *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. camaldulensis*, *E. viminalis*, *E. delegatensis*, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. tereticornis*, *E. obliqua*, *E. odorata*.

Formas de detección: Desprendimiento de corteza de la zona afectada por el anillamiento provocado por las larvas, existencia de árboles con la copa muerta y retoñación en la base del tronco, presencia de larvas y galerías, tapones de resina en el fuste y perforaciones ovaladas en el tronco (INFOR, 1999; Ramirez y De Ferrari, 1995)

Daños: Clorosis y caída de hojas en el follaje, anillamiento y muerte del árbol.

Control: Biológico con parásito de huevos (*Avetianella longo*), silvicultural mediante raleo sanitario e instalación de árboles cebos, químico con insecticidas de contacto.



Figura N° 2
ADULTO DEL TALADRADOR

- ***Chilecomadia valdiviana* Gusano del tebo**

Descripción general, origen y presencia: Corresponde a un lepidóptero de color plumbeo, de origen nativo y que se encuentra presente desde la Región de Atacama hasta la Región de Aysén.

Hospedantes principales: Está presente en varias especies nativas y frutales y afecta principalmente a *E. nitens*.

Formas de detección: Exudación de resina en el fuste, mancha oscura de la corteza, olor a fermentación, heridas y hundimiento en el fuste. Presencia de avispa chaqueta amarilla (*Vespula germanica*) (INFOR, 1999; Ramirez y De Ferrari, 1995).

Daños: Galerías, heridas y quebraduras de fuste.

Control: Raleo sanitario, detección precoz y eliminación de árboles afectados.

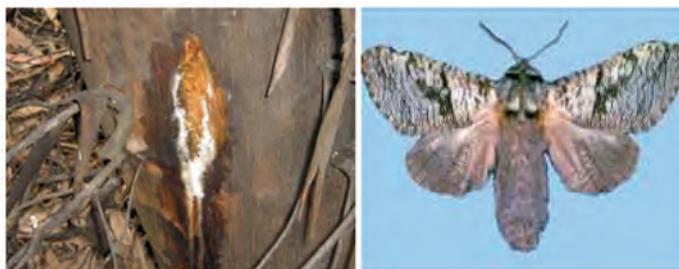


Figura N° 3
DAÑO CAUSADO POR GUSANO DEL TEBO Y ADULTO DEL GUSANO DEL TEBO

- ***Cteranytaina eucalypti* Psilido**

Descripción general, origen y presencia: Corresponde a un pulgón muy pequeño, de color morado oscuro que salta al tocarlo. Es originario de Australia y se encuentra presente en Oceanía, Europa, Norteamérica y casi toda Sudamérica. En Chile se encuentra presente desde la Región de Arica y Parinacota hasta la Región de Los Lagos.

Hospedantes principales: *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. cinerea*, *E. pulverulenta*, *E. leucoxylon*, *E. gunnii*.

Formas de detección: Brotes del follaje juvenil con diminutos insectos de aspecto pulverulento y de color blanquecino. Además se presentan deformaciones de hojas juveniles y brotes de las ramas (INFOR, 1999; Ramirez y De Ferrari, 1995).

Daños: Pérdida por deformaciones causadas por desecación paulatina de ápice, brotes y hojas sésiles.

Control: Biológico con parásito de ninfas *Psyllaephagus pilosus*



Figura N° 4
NINFAS Y ADULTOS DEL PSILIDO

- ***Thaumastocoris peregrinus* Chinche**

Descripción general, origen y presencia: Corresponde a un insecto de hábito gregario, de cuerpo achatado y color café claro, originario de Australia y que está presente en África y Sudamérica. En Chile se encuentra en la RM y Región de Valparaíso.

Hospedantes principales: *Eucalyptus globulus*, *E. viminalis*, *E. tereticornis*, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. dunnii*, *E. robusta*, *E. smithii*.

Formas de detección: Se reconocen por sus hábitos gregarios y ante cualquier disturbio los adultos corren rápidamente por las ramas (Ramirez y De Ferrari, 1995).

Daños: Reducción de la tasa fotosintética, retraso en el crecimiento, defoliación y en casos severos muerte del árbol.

Control: Control biológico con parásito de huevos (*Cleruchoides noackae*).



Figura N° 5
ADULTO Y NINFAS DEL CHINCHE

- ***Tettigades chilensis* Chicharra**

Descripción general, origen y presencia: Es un insecto nativo, el adulto con alas plegadas presenta forma triangular, cabeza grande, antenas cortas y alas transparentes con venas. Se encuentra presente desde la Región de Coquimbo hasta la Región de La Araucanía.

Hospedantes principales: Plantas jóvenes del género *Eucalyptus*, especies nativas y frutales

Formas de detección: Se reconoce por el daño que causa el adulto que corresponde a un astillado longitudinal en tallos (INFOR, 1999; Ramirez y De Ferrari, 1995).

Daños: Deformaciones en el fuste, quiebre del tallo, formación de canchales, mortalidad de plantas.

Control: Mecánico mediante aradura en profundidad, químico con piretroides, silvícola mediante plantación temprana, en buenos sitios y en suelos preparados y con fertilización.



Figura N° 6
OVIPOSTURA DE CHICHARRA Y EJEMPLAR ADULTO

- ***Glycaspis briblecombei* Psilido eucaliptos rojos**

Descripción general, origen y presencia: Corresponde a un piojo de color rojizo claro, nativo de Australia y que está presente en México, EE.UU y Chile, en las Regiones de Valparaíso y Metropolitana. Las ninfas viven en forma individual bajo un cono blanco.

Hospedantes principales: *Eucalyptus globulus*, *E. nitens*, *E. camaldulensis*, *E. cladocalyx*

Formas de detección: Se reconoce por la formación de conos de color blanco sobre las hojas, bajo los cuales se cubren las ninfas (Ramírez y De Ferrari, 1995).

Daños: Defoliación y debilitamiento de los árboles.

Control: Biológico con parásito de ninfas (*Psyllaephagus bliteus*)



Figura N° 7
NINFAS BAJO CONO BLANCO

- ***Porotermes quadricollis* Termitas**

Descripción general, origen y presencia: Corresponde a un insecto nativo de hábito social de forma alargada, de color claro, ligeramente aplastado, con cabeza café clara. Se encuentra presente desde la Región de Valparaíso hasta la Región de Aysén

Hospedantes principales: Árboles en pie, madera elaborada húmeda, pilotes de madera. Es común en bosques hidrófilos de la Región de Valparaíso al sur. Atacan tanto a especies nativas como exóticas.

Formas de detección: Se reconoce por la presencia de los adultos que corresponde a insectos de cuerpo alargado de color claro con cabeza de color café clara y sus prominentes mandíbulas (Ramírez y De Ferrari, 1995).

Daños: Efectúan galerías consumiendo madera.

Control: Biológico con hormigas depredadoras, aves y reptiles.



Figura N° 8
DAÑO CAUSADO POR TERMITAS, ADULTOS EN GALERIAS

Enfermedades

- Hongos defoliadores

Distribución: Se encuentran en Oceanía, Europa, Norteamérica, Sudáfrica y Sudamérica. En Chile la principal especie, *Teratosphaeria nubilosa*, no se encuentra presente, pero hay más de 70 especies de hongos defoliadores presentes, algunas de las cuales corresponden a hongos saprófitos y oportunistas.

Hospedantes principales: Un gran número de especies de eucaliptos son altamente susceptibles, entre ellos *Eucalyptus globulus* y *E. nitens*.

Daños: Lesiones y deformaciones en hojas, lo cual disminuye fotosíntesis (Carnegie *et al.*, 1994).

Control: Genético, el uso de especies y variedades resistentes es lo más apropiado. Silvícola, reducir la densidad de la plantación, fertilizar y plantar genotipos más tolerantes o resistentes.



Figura N° 9
MANCHAS FOLIARES

- ***Botryosphaeria dothidea* Muerte regresiva**

Distribución: Se encuentra presente en Oceanía, Europa, África, Asia y Sudamérica.

Hospedantes principales: Afecta un gran número de especies de eucalipto y especies frutales.

Daños: Produce muerte de copa, infección de la médula, manchado del centro de la madera, canchros en el tronco (Smith *et al.*, 1994).

Control: Mejorar el vigor de los árboles, para hacerlos más resistentes, cortar y coleccionar en el verano todos los canchros viejos, protegiendo las heridas de poda con fungicidas.



Figura N° 10
CANCROS EN EL TRONCO

- ***Oidium eucalyti* Polvillo blanco foliar**

Distribución: Es un hongo ectoparásito y cosmopolita.

Hospedantes principales: Afecta un gran número de especies de eucalipto entre los que no están ajenos *Eucalyptus globulus* y *E. nitens*.

Daños: Produce la deformación de las hojas, disminuyendo la fotosíntesis (Ramirez y De Ferrari, 1995).

Control: Químico con fungicidas del tipo Benlate o Karathane o Polvo de Azufre.



Figura N° 11
POLVILLO BLANCO EN HOJAS

- ***Macrophomina phaseolina* Pudrición carbonosa**

Distribución: Se encuentra presente en todos aquellos lugares donde el suelo alcanza altas temperaturas.

Hospedantes principales: Todas las especies de eucalipto pueden ser afectadas.

Daños: La enfermedad comienza con la infección de las raíces, que toman un color café oscuro a negro, y les impide transportar agua. El hongo coloniza el floema y cambium y asciende hacia el cuello de la planta (Ramírez y De Ferrari, 1995).

Control: Químico con aplicaciones de fungicidas del tipo Antracol y/o Captan al suelo. Silvicultural en viveros aumentando la frecuencia de riegos.



Figura N° 12
DAÑO EN RAÍCES

- ***Phytophthora cinnamomi* Pudrición de raíces**

Distribución: Es un hongo cosmopolita que ataca raíces en plantas de viveros y plantaciones.

Hospedantes principales: Todas las especies de eucalipto pueden ser afectadas.

Daños: Causa pudrición de raíces, afectando el proceso de absorción de agua (Ramírez y De Ferrari, 1995).

Control: No se conoce control operativo. Para prevenir el daño se debe asegurar el uso de plantas sanas. Debe cuidarse el drenaje del sitio de plantación.



Figura N° 13
FOLLAJE AFECTADO POR DAÑO EN RAICES

Otros Agentes de Daño

- Lagomorfos *Lepus capensis* y *Oryctolagus cuniculus* Liebre y Conejo

Distribución: La liebre se distribuye desde la Región de Atacama hasta la Región de Magallanes. El conejo se encuentra presente en todo el país.

Descripción: La liebre es un animal de tamaño medio, de 70 a 75 cm de longitud, de color amarillento, de hábitos solitario y evita campos abiertos. El conejo es más pequeño con orejas y patas posteriores más cortas y de color plumizo, de hábito social y muy prolífero.

Daño: Ambos causan descalce de plantas y corte por roedura, al marcar su presencia en el territorio (Ramírez, O. y De Ferrari, L., 1995).

Control: Silvicultural, empleando plantas de mayor diámetro de cuello y más lignificadas. Químico con el uso de repelentes o de venenos autorizados por SAG.



Figura N° 14
CORTE DE PLANTAS CAUSADAS POR LAGOMORFOS

- Roedores *Octodon bridgesi* Degú de los matorrales, *Abrothix longipilis* Ratón de pelo largo y *Abrocoma bennetti* Ratón chinchilla.

Distribución: Se encuentran causando ocasionalmente daños, principalmente en la

Región del Maule y la Región del Biobío.

Descripción: Las señaladas son las especies más importantes, todas ellas son especies protegidas por CITES².

Daño: Principalmente causan daños en plantaciones de pino, pero también en algunos casos afectan plantaciones de eucalipto, royendo la corteza a diferentes alturas y provocando la muerte del árbol (Ramírez y De Ferrari, 1995).

Control: Delimitación del área por fajeo o franjas limpias sin vegetación para facilitar la acción de aves rapaces nativas.



Figura N° 15
DAÑO CAUSADO POR ROEDORES EN PINO

PRINCIPALES PLAGAS Y ENFERMEDADES POTENCIALES

Plagas

- *Lectoclypeus invasa* Avispa formadora de agallas

Distribución: Es originaria de Australia. Se encuentra presente en Europa, África, Asia y el Pacífico. En América está presente en EE.UU, Brasil y Argentina.

Descripción: Induce la formación de agallas en hojas juveniles, pecíolos, ramillas y tallos delgados. Sus daños son más relevantes en viveros y plantaciones jóvenes (Comisión Técnica CPF-SA, 1998; Ramírez y Contreras, 2007).

Hospedantes: *Eucalyptus camaldulensis* es la especie más susceptible, pero también afecta *E. globulus*, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. maidenii*, *E. robusta*, *E. tereticornis*, *E. viminalis*.

Vías de ingreso: Medios de transporte (Aviones y vehículos) y transporte ilegal de follaje.

Potencial daño económico: Graves daños, principalmente en viveros.

Control: Biológico con parásitos tales como: *Quadrastichus mendeli*, *Selitrichodes kryceri*, *Megastigmus zvimendeli*.

² Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Fauna y Flora Silvestres.



Figura N° 16
DAÑO CAUSADO EN HOJAS Y PECIOLO Y ADULTO DE LA AVISPA

- ***Eriococcus coriaceus* Conchuela**

Distribución: Nativa de Australia y ha sido introducida en Nueva Zelanda.

Descripción: Escamas que se ubican en las ramas y tallos, dónde succiona la savia de las plantas, pudiendo causar la muerte de ellas. Se encuentra en los tallos nuevos, ramas y ramillas cubierta por sacos de color amarillo a café oscuro, dónde se encuentra la hembra (Elliot and de Little, 1994).

Hospedantes: *Eucalyptus globulus*, *E. viminalis*, *E. gunnii*, *E. macarthurii*

Vías de ingreso: Pueden ser movilizadas en estacas de eucalipto enraizados, de un lugar a otro.

Potencial daño económico: Reduce la actividad fotosintética. En ataques severos puede causar la muerte de la planta (Jacobs, 1979; Ramirez y Contreras, 2007).

Control: Biológico con la introducción de un Coccinélido, *Rhizobius ventralis*; un Díptero, *Pseudoleucopis benéfica*; y una polilla. Mecánico cepillando las ramas, solo cuando el ataque es leve.



Figura N° 17
CONCHUELAS EN RAMILLAS

Enfermedades

- *Corticium salmonicolor* Enfermedad rosada

Distribución: Se encuentra presente en Asia, Australia, Sudáfrica, Nueva Zelandia y América Latina, en Brasil.

Descripción: Hongo que tiene cuatro formas distintas. Todas las formas ocurren en tallos con corteza joven y ramas principales. Los primeros síntomas consisten en la exudación de savia en el tallo de la planta, después comienza con la aparición de un micelio que se va tornando de color rosado, para la posterior introducción del hongo en el interior de la madera, lo que puede provocar la muerte de grandes porciones de la copa del árbol, pero raramente lo mata completamente. La corteza muere y la capa de micelio se seca formando pústulas rosadas y costras que, generalmente, se ubican en el lado inferior de las ramas (Ferreira and Alfenas, 1977; Ferreira, 1989).

Hospedantes: Posee una gran variedad de árboles huéspedes, que se presentan en la mayoría de las regiones tropicales y subtropicales húmedas, atacando a *Eucalyptus camandulensis*, *E. maculata*, *E. robusta*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. globulus*, *E. grandis*, *E. tereticornis*, *Corymbia citriodora* y otras especies.

Vías de ingreso: Las basidiosporas y conidias del hongo *Corticium salmonicolor* son transportadas por el viento. El transporte de *chips* en *container* con alta humedad puede llevar los cuerpos frutales y esporas del hongo (Ramirez y Contreras, 2007).

Potencial daño económico: *Corticium salmonicolor* es una de las enfermedades más importantes en las plantaciones de *Eucalyptus spp.* Posee una gran variedad de árboles huéspedes, que se presentan en la mayoría de las regiones tropicales y subtropicales húmedas, atacando árboles de cualquier edad, pero los jóvenes son más vulnerables, provocándoles daños muy severos.

Control: Mecánico, efectuando cortes y destrucción parcial o total de los árboles enfermos en la época de verano, poda de las partes comprometidas y quema de todas las plantas afectadas. Selección genética o de variedades resistentes al patógeno. Se han realizado algunas experiencias de control químico con productos cúpricos y con fungicidas ditiocarbamatos sobre las ramas y troncos infectados.



Figura N° 18
MICELIO ROSADO CAUSADO POR EL HONGO

- ***Cryphonectria cubensis* Cancer basal**

Distribución: Se encuentra presente en América Central, América del Sur, Asia y Oceanía.

Descripción: Hongo que infecta los árboles a través de las heridas con esporas asexuales que propaga el viento y la lluvia. Provoca anillamiento de troncos en la base, la corteza se parte y se forma un abultamiento. Atizonamiento de las hojas (Wingfield et al., 1989).

Hospedantes: *Eucalyptus grandis*, *E. camaldulensis*, *E. saligna* y *E. tereticornis* son las especies más susceptibles.

Vías de ingreso: Este hongo penetra por las heridas y en climas de alta humedad ve favorecida su propagación (Jacobs, 1979).

Control: Resistencia genética con producción de clones resistentes.



Figura N° 19
ANILLAMIENTO DEL TRONCO EN LA BASE

- ***Puccinia psidii* Roya defoliadora**

Distribución: Se encuentra presente en América del Sur en Argentina, Brasil, Paraguay, Uruguay y Venezuela.

Descripción: Este hongo es un moho estacional y su severidad varía según la susceptibilidad del material y de las condiciones atmosféricas. Es el polvillo más típico, de color amarillo, presente en yemas, hojas y brotes, surgiendo de pústulas. Cuando el ataque principal ha pasado, las hojas y brotes muestran importantes áreas necróticas y deformaciones (CABI, 1993).

Hospedantes: Afecta numerosas especies de la familia *Myrtaceae* y, en el género *Eucalyptus*, afecta principalmente *Eucalyptus globulus* y *E. grandis*. Además afecta guayabos, pitanga, arrayán, etc.

Vías de ingreso: Este hongo se dispersa por el viento y la lluvia. Puede ingresar a través de plantas infestadas o restos de corteza (Ramírez y Contreras, 2007).

Control: Químico, el control con aplicaciones de fungicidas baja la incidencia de la enfermedad, sin embargo, el inóculo es prácticamente imposible de erradicar por lo que es necesario repetir las dosis de fungicidas a intervalos regulares, hasta que pasen las condiciones predisponentes.

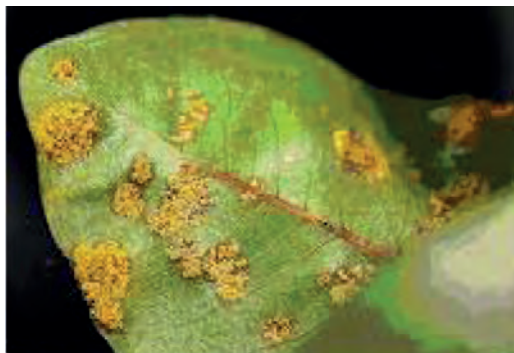


Figura N° 20
UREDOSPORA DEL HONGO

CONCLUSIONES

En muchas plantaciones se privilegia el uso de especies del género *Eucalyptus* debido a que presentan rápido crecimiento, son fáciles de cultivar y tienen una gran demanda en la industria. Sin embargo, se debe considerar la elección de un buen sitio y establecer cada especie en lugares que le sean adecuados. Esto muchas veces no sucede, lo que trae consigo que la planta no crezca en buenas condiciones y que se manifiesten agentes oportunistas que provoquen daños a la plantación.

También es importante considerar los riesgos del movimiento del germoplasma. Antes de llevarlo a cabo, es fundamental hacer un análisis de riesgo de plagas. Este material no debe ser liberado en el campo, a menos que esté confirmado que está libre de plagas. Cuando este no sea el caso, debería ser destruido.

El traslado de semillas sin tomar los resguardos respecto de su fumigación, secado a menos de 6% de humedad, y tratamiento con fungicidas, también es algo que se debe evitar.

La inspección del material *in vitro*, antes de su ingreso al país, es también importante y se recomienda moverlo solamente en medio estéril.

El movimiento de estacas o *cuttings* tampoco es recomendable, por los riesgos del traslado de importantes problemas fitosanitarios, a menos que sean estrictamente revisados, limpiados y esterilizados.

Plantar genotipos más tolerantes y resistentes, es una buena medida de prevención.

La prevención silvicultural, a través de una adecuada fertilización y una frecuencia adecuada de riegos, puede disminuir los probables daños causados por algunos hongos. La elección de sitios con buen drenaje es también una buena medida preventiva.

Es conveniente cuidar el transporte de *chips* en contenedores, ya que se puede transportar cuerpos frutales y esporas de algún hongo.

REFERENCIAS

CABI, 1993. Forestry Pest Management Newsletter for Eastern and Southern Africa1: 3-5

Carnegie, A. J.; Keane, P. J.; Ades, P. K. and Smith, I. W., 1994. Variation in susceptibility of *Eucalyptus globulus* provenances to *Mycosphaerella* leaf disease. Can. J. Botany 24: 1751-1757.

Comisión Técnica CPF-SA, 1998. Manual de plagas cuarentenarias potencialmente dañinas para Chile.

Elliot, H. J. and D. W. de Litle, 1994. Insect pests of trees and timber in Tasmania, Forestry Commission, Tasmania Australia.

Ferreira, F. A., 1989. Patología Florestal, principais doenças florestais no Brasil. SIF, Viscosa MG Brazil.

Ferreira, F. A. and A. C. Alfenas, 1977. Pink disease of *Eucalyptus* caused by *Corticium salmonicolor*. Fitopatologia Brasileira 2: 109-115

INFOR, 1999. Manual de detección y evaluación sanitaria en eucalipto.

Jacobs, M. R., 1979. *Eucalyptus* for planting FAO Forestry SERIES N°11, FAO Rome Italy.

Ramirez, O. y De Ferrari, L., 1995. Manual de detección y control de plagas y enfermedades presentes y potenciales en pino y eucalipto.

Ramirez, O. y Contreras, N., 2007. Manual de principales plagas y enfermedades potenciales del eucalipto en Chile.

Smith, H.; Kemp, G. H. J. and Wingfield, M. J., 1994 Canker and die-back of *Eucalyptus* in South Africa caused by *Botryosphaeria dothidea* Plant Pathol. 43: 1031-1034.

Wingfield, M. J.; Swart, W. J. and B. J. Abear, 1989. First record of *Cryphonectria* canker of *Eucalyptus* in South Africa.



6. PLATAFORMA GRIN-GLOBAL PARA EL MANEJO DE RECURSOS GENÉTICOS EN EL INSTITUTO FORESTAL¹

Roberto Ipinza C.²
Maria Paz Molina B.³
Cristián Rojas P.²
Braulio Gutiérrez C.²
Oriana Ortiz N.⁴

INTRODUCCIÓN

El Ministerio de Agricultura ha implementado el Portal Nacional del Centro de Recursos Biológicos Públicos para facilitar el acceso a las accesiones y a la información conservada en los bancos de germoplasma administrados por instituciones públicas de esa cartera. El referido portal utiliza el sistema Grin-Global (GG), tanto para el manejo estandarizado de las accesiones como para darlas a conocer y permitir el acceso a aquellas personas u organizaciones interesadas en su utilización.

En este contexto, el Instituto Forestal (INFOR) se encuentra implementando la plataforma GRIN-GLOBAL, donde incorporará la información de sus bancos activos de germoplasma de numerosas especies forestales, que incluyen un banco de semillas, un banco *in vitro* de germoplasma, huertos semilleros clonales, ensayos de progenie y procedencias y ensayos de progenies, además de un banco *in vitro* de hongos micorrícicos y comestibles, entre los más importantes, los que totalizan un número aproximado de 10.000 accesiones. Toda esta información se anexará al Portal Nacional del Centro de Recursos Biológicos Públicos (MINAGRI), lo que permitirá poner el material genético nativo y exótico a disposición de los usuarios, para efectos de emprendimientos y utilización.

El Estado chileno, a través del Ministerio de Agricultura, tiene la responsabilidad de orientar la innovación del sector público en aspectos tales como: conservación de los recursos naturales, biodiversidad y recursos forestales. En este contexto, un elemento determinante para desarrollar cualquier programa de mejoramiento genético es el disponer de un acceso expedito a una amplia gama de recursos genéticos. Adicionalmente y en concordancia con enunciados de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE), se debe transparentar y facilitar el acceso a los recursos genéticos obtenidos con financiamiento público. Para este fin se ha iniciado la adaptación y poblamiento de una base de Recursos Genéticos Forestales (árboles y hongos) en el Portal Grin-Global que será coordinada por el Centro de Recursos Biológicos Públicos de CIREN - Chile (Centro de Información de Recursos Naturales). La elaboración de esta base facilitará la administración y permitirá la visualización de dicho material genético por cualquier usuario en cualquier parte del mundo. De este modo se cumple con la transparencia y la facilitación del acceso al material e información, ya sea para investigación, conocimiento o emprendimiento de los potenciales usuarios del sector forestal chileno y eventualmente internacional.

1 Este documento fue presentado en el III Congreso Latino Americano de IUFRO (IUFROLAT III) San Jose, Costa Rica, junio 2013.

2 Instituto Forestal sede Valdivia. roberto.ipinza@gmail.com; crojas@infor.cl

3 Instituto Forestal sede Bio Bio. mmolina@infor.cl; bgutierr@infor.cl

4 oriana1.ortiz@gmail.com

Por último, en este mismo contexto el Ministerio de Agricultura de Chile, mediante resolución exenta N° 577 del 15 de Noviembre del 2013, aprobó el Convenio Marco de Colaboración y Trabajo para el Desarrollo de la Red Nacional de Bancos de Germoplasma. Esto implica la conformación de un comité técnico público-privado que entre otras funciones coordinará el poblamiento del Grin-Global en cada una de las respectivas instituciones participantes.

GRIN-GLOBAL

Grin-Global (GG) es una plataforma internacional de programas que permite manejar, publicar y consultar información de los recursos genéticos vegetales (o germoplasma). En el año 2008, el Global Crop Diversity Trust otorgo una subvención al United States Department of Agriculture/Agricultural Research Service (USDA/ARS) y Bioversity International, para mejorar y expandir el sistema GRIN de información Global de Germoplasma. .

La plataforma permite a los Bancos de Germoplasma, almacenar y manejar información de las colecciones de recursos genéticos (germoplasma) mantenidos por ellos, y darlos a conocer globalmente a través de Internet. Grin-Global fue desarrollado a partir de software en *suite* libre y abierto, para facilitar el acceso de los distintos Bancos de Germoplasma, según sus requerimientos y necesidades específicas. Grin-Global, permite administrar una gran variedad de información de las accesiones, como pasaporte, procedencia, marcadores neutrales y adaptativos, imágenes del germoplasma, observaciones fenotípicas y genéticas, inventarios, disponibilidad y requerimientos de germoplasma, entre muchos otros más.

RECURSOS GENÉTICOS FORESTALES Y CONSERVACION

El objetivo del manejo forestal sustentable es usar los bosques de una forma tal que su capacidad para proveer una amplia gama de productos, beneficios socioeconómicos y servicios ambientales, no disminuya en el tiempo. La conservación de la diversidad genética en el largo plazo, es un elemento fundamental para el manejo forestal sostenible, especialmente si se consideran los efectos del cambio climático, ya que esta asegura que el bosque pueda sobrevivir, adaptarse y evolucionar bajo condiciones ambientales cambiantes; además es necesaria para mantener su vitalidad y hacer frente a plagas y enfermedades (Koskela *et al.*, 2007).

Desde el punto de vista de la conservación y el mejoramiento genético, la diversidad genética se refiere a cualquier variación de los nucleótidos del genoma de una especie (Ulukan, 2008). Se la considera un recurso natural necesario para el mejoramiento en el largo plazo (Yunbi, 2010), sin el cual se reducen las posibilidades de mejorar las características de interés y del éxito de un programa de mejoramiento (Ipinza, 2000).

De acuerdo a Libby (1987) las especies forestales generalmente exhiben extensos ciclos de vida y son organismos altamente heterocigotos, que han desarrollado mecanismos naturales para mantener altos niveles de variación intraespecífica. Estos mecanismos combinados con ambientes naturales que frecuentemente son variables, han determinado que algunas de las especies de árboles sean los organismos que poseen la mayor variabilidad genética en la naturaleza. Por esta razón, los sistemas de producción silvícolas y agroforestales, son muy dependientes de la disponibilidad permanente de la diversidad de recursos genéticos, tanto a nivel de especies como de procedencias (poblaciones) (FAO-FLD-IPGRI, 2004).

Los componentes del manejo de recursos genéticos en la agricultura, según Ledig (1995) consideran los siguientes aspectos: Recolección, documentación, caracterización, almacenamiento, evaluación, multiplicación, distribución y utilización. En el caso de las especies forestales, además debe contemplarse el manejo de rodales naturales, que es una particularidad única de la conservación, que atañe sólo a la silvicultura.

El objetivo de una colecta de recursos genéticos, es captar la máxima cantidad de variación genética útil, en el menor número de muestras (Marshall y Brown, 1975). La caracterización corresponde a una descripción de la variación que existe en una colección de germoplasma, que permite diferenciar las accesiones de una especie (Abadie y Berretta, 2001). De acuerdo a Engels y Visser (2007), el Curador de un Banco de Germoplasma, debe evaluar con exactitud la viabilidad inicial de las accesiones, antes de su almacenamiento, y monitorearlas durante el período de almacenamiento.

Ledig (1995), señala que encerrar material vegetal o semillas en un Banco de Germoplasma no es la meta final de la conservación de recursos genéticos, sería como una biblioteca que no posee catálogos y donde no es posible tomar y consultar los libros. Si la información de los Bancos de Germoplasma no se puede almacenar y recuperar, o si nadie sabe que existe, entonces el esfuerzo desplegado en la mantención de esta estructura es inútil. Un buen sistema de documentación, de acuerdo a Painting *et al.* (1993), idealmente debiera proporcionar protección y asegurar la integridad de los datos, permitir una rápida recuperación de la información, ser de fácil operación para el usuario y proveer una buena organización de los datos.

Proveer una adecuada documentación es esencial para el manejo de Bancos de Germoplasmas, ya que la caracterización y evaluación de las accesiones son de poco valor si ellas no están incorporadas en un sistema de información que facilite el acceso y consulta de los datos. La información exacta del material conservado promueve y facilita su utilización. En este sentido, los sistemas de documentación computarizados permiten una rápida difusión de la información a los usuarios y ayuda al curador a manejar las colecciones de germoplasma de una manera más eficiente (Upadhyaya *et al.*, 2008),

Los bancos de germoplasma tendrán problemas en el manejo de sus colecciones si no cuentan con información actualizada, veraz y confiable, almacenada en un sistema de documentación efectivo. Tal sistema de documentación le permite al banco usar información para planear sus actividades diarias y aprovechar el uso de sus recursos frecuentemente limitados. Del mismo modo, sin un sistema de documentación efectivo los bancos de germoplasma no pueden desarrollarse hacia un objetivo definido y presentan problemas de comunicación y colaboración con otras instituciones.

ESTRUCTURA DE LA PLATAFORMA GRIN-GLOBAL

La plataforma de Grin-Global se basa en una arquitectura de tres capas; Datos, Negocios y Presentación (Figura N° 1).

Capa de Datos: Es donde residen los datos y es la encargada de acceder a los mismos. Está formada por uno o más gestores de bases de datos que realizan el almacenamiento y reciben solicitudes de almacenamiento o recuperación de información desde la capa de negocio. Esta plataforma esta soportada por los motores de base de datos PostgreSQL, MS SQL Server, Oracle o MySQL.

Capa de Negocio: Es donde residen los programas que se ejecutan, se reciben las peticiones del usuario y se envían las respuestas tras el proceso. Se denomina capa de negocio porque es aquí donde se establecen todas las reglas que deben cumplirse, mediante servicios web. Esta capa se comunica con la capa de presentación, para recibir las solicitudes y presentar los resultados, y con la capa de datos, para solicitar al gestor de base de datos almacenar o recuperar datos de él. En este caso específico, la plataforma utiliza XML para compartir la estructura de datos entre todos los clientes y la capa de negocios

Capa de Presentación: Es la que presenta el sistema a los usuarios, les comunica la información y captura la información del usuario en un mínimo de proceso. También es conocida como interfaz gráfica y debe tener la característica de ser “amigable” (entendible y fácil de usar). Esta plataforma se presenta como una página web o cliente de escritorio. Esta capa se comunica únicamente con la Capa de Negocio.

La capa de presentación, a la cual podrá acceder el usuario final, tiene dos opciones disponibles de visualización de la información, un cliente de escritorio y uno a través de un explorador web, que se detallan a continuación. Existe una tercera en desarrollo para dispositivos PDA.

Cliente de Escritorio (Herramienta Curador): Es una herramienta curador que permite trabajar en un propio computador, su distribución es limitada, está orientada a usuarios que tienen un conocimiento básico de genética. Está diseñada para el manejo de la base de datos, es decir permite insertar, actualizar y eliminar registros. Esta herramienta tiene múltiples funciones que facilitan las tareas del curador, está dirigida a los sistemas operativos que soportan el NET Framework 3.5.

Cliente basado en un explorador web: Es abierta para uso público, no requiere un registro de usuario y es la página web que puede ser visitada por cualquier tipo de usuario. Está diseñada para la búsqueda y realización de pedidos de los germoplasmas.



Figura N° 1
ESTRUCTURA EN CAPAS DE LA PLATAFOMA GRIN-GLOBAL

DEFINICIÓN Y USO DE DESCRIPTORES

Los descriptores son uno de los aspectos más relevante para la caracterización del germoplasma que se administra con el sistema Grin-Global. Los descriptores que se usan con tal finalidad han sido propuestos por IPGRI (Bioversity) y se clasifican en descriptores de pasaporte, de manejo, de ambiente y de sitio, de caracterización y de evaluación. Los de caracterización son normalmente de responsabilidad del curador, mientras que los de evaluación son el trabajo de un grupo multidisciplinario de científicos, que retroalimentan el banco y mantienen el archivo de datos.

Descriptores de Pasaporte: Pertenecen a una categoría de descriptores pasaporte de multicultivos (MCPD por sigla en inglés). Ellos incluyen un gran número de indicadores ideados para caracterizar la accesión y la colecta. Entre los descriptores de la accesión se encuentran algunos tales como: el Código de la Institución; el número de la accesión; el nombre científico; el origen de la accesión, el tamaño de la accesión, el tipo de material y diversos otros.

Entre los descriptores de colecta se utilizan: El nombre y número del instituto que patrocina la colecta; el número asignado al sitio físico de colecta; el número de la colecta; la fecha; el país, provincia y estado; la localización, coordenadas; elevación, etc.

Descriptores de Manejo: Involucran información de manejo y multiplicación.

Entre los indicadores de manejo propiamente tal se encuentran: Número de la planta individual; identificación de la población; localización de la accesión en el huerto (bloque, número de fila y número de árbol dentro de la fila, para cada árbol duplicado de cada accesión); dirección de almacenamiento; fecha de plantación; tipo de germoplasma almacenado (Colección de semilla, Colección en campo, Colección *in vitro*, Colección de criopreservación, otras); tipo de explante; fecha de introducción, etc.

Entre los indicadores de Multiplicación los más comunes son: Numero de accesiones; identificación de la población; número de la parcela de campo; localización del sitio de multiplicación o regeneración; colaboradores; año de regeneración; método de propagación (semilla, gemación, injertos, enraizamiento, cultivo de tejido, otros); fecha de siembra o plantación, etc.

Descriptores de Ambiente y de Sitio: Involucran información tal como: País; sitio; coordenadas; altitud; nombre y dirección del evaluador; fecha de la siembra (injertación, enraizamiento, etc.); ambiente de evaluación (campo, sombreadero de selección, invernadero, laboratorio, otros); etc.

Descriptores de Caracterización: Involucran información descriptiva de la planta y de sus órganos (hojas, flores, frutos, semillas) tales como: Edad; vigor; altura, diámetro del tronco; espesor de corteza; forma de copa, etc. Para hojas: Longitud, ancho, forma, forma de base, forma de ápice, forma de márgenes, así como otros equivalentes o similares para frutos, semillas y flores.

Descriptores de Evaluación: Son aquellos que proporcionan información referente al desempeño de las plantas, tanto en rendimiento como en susceptibilidad a estreses bióticos o abióticos; también se usan para proveer de información respecto a marcadores bioquímicos, moleculares, características citológicas e identificación de genes.

La versatilidad del sistema Grin-Global permite complementar la información de la accesión con posterioridad a su creación en el sistema. En general, las accesiones que posee INFOR no cuentan con toda la información posible propuesta en los descriptores anteriores, pero aún así la accesión estará visible para los potenciales usuarios. Debe existir un compromiso de las instituciones de complementar la información relevante de la accesión para la toma de decisiones correcta de los usuarios.

IMPLEMENTACIÓN DE PLATAFORMA GRIN-GLOBAL EN INFOR

Grin-Global es un sistema de información relativa al manejo de los bancos de germoplasma que incorpora características de red. Como se ve en la Figura N° 2, el banco manejado por INFOR alimentará una base de datos nacional y desde este portal estará disponible al público en general. Sin embargo, todos los datos de la base de INFOR podrán ser consultados de forma directa a través del sitio manejado para tales efectos. Esto facilita el intercambio de información y a su vez realiza un proceso más transparente para las instituciones asociadas al Banco Nacional de Germoplasma, ya que una vez ingresado por algún usuario genetista bajo la herramienta curador, cualquier usuario final podrá ver la información disponible a través de la página web.

Actualmente se está adaptando los registros de la base de datos, que se tenían en planillas Excel, a la base de datos de la plataforma para poder dejarlos a disposición a través del sitio web para el usuario final. Cabe destacar que INFOR se adapta a la base de datos de Grin-Global, ya que la plataforma comparte el esquema de esta y detalla cada una de sus tablas, y se encuentra en constante actualización realizada por un panel de expertos a nivel mundial.

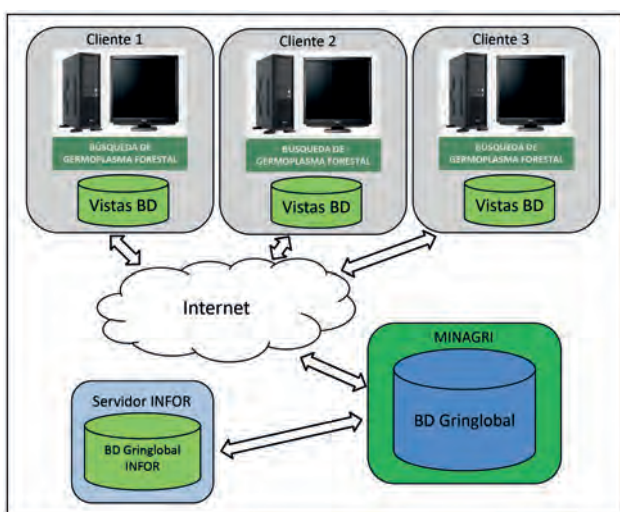


Figura N° 2
IMPLEMENTACIÓN DE PLATAFORMA GRIN-GLOBAL EN INFOR

En el ámbito forestal los bancos de germoplasma incluyen no solo las colecciones más tradicionales, como son semillas y explantes *in vitro* de materiales valiosos tanto en el sentido económico, ecológico, social o ambiental, sino que también colecciones *in vivo* que están establecidas en terreno. Las especies forestales en su mayoría requieren largos periodos de crecimiento para reflejar su potencial productivo, adaptativo, respuestas fenológicas o su comportamiento ante nuevas amenazas, tales como plagas y enfermedades. Siguiendo los postulados del mejoramiento genético, lo anterior se refleja generalmente a partir de la mitad del turno de rotación. En el caso chileno, en las especies forestales nativas este plazo no es menor a 15 años y en las especies de más rápido crecimiento, principalmente exóticas, este plazo puede estar entre los 6 y 7 años.

Los bancos de germoplasma de especies forestales que actualmente posee INFOR han sido generados a través de programas de mejoramiento genético destinados a aumentar la productividad maderera (pulpa o madera sólida), adaptación a condiciones de estrés hídrico, heladas y suelos degradados, y más recientemente algunos orientados a especies para la producción de frutos multifuncionales (alimentación y farmacología).

Paralelamente se ha generado un Banco de Micorrizas forestales focalizado especialmente en las 3 principales especies plantadas en el país, *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *E. nitens* y también para especies nativas del género *Nothofagus*, pero a menor escala. Cabe señalar que la investigación en el ámbito de las micorrizas nativas es incipiente en Chile, aún cuando se visualizan claros problemas de esta deficiencia cuando se establecen en terreno plantaciones con especies nativas en lugares donde las micorrizas asociadas no están presentes. El material genético de este banco está resguardado como cultivo miceliar en placas de petri.

Los formatos de banco de germoplasma de especies forestales que posee INFOR van desde semilla de árboles individuales seleccionados por superioridad para una determinada característica, hasta clones de los mismos establecidos en terreno en diseños apropiados para evaluar su desempeño. Dentro de este espectro existen copias de algunos en jardines clonales en vivero, copias micropropagadas en laboratorio, progenies de los mismos establecidos con diseños genéticos y, por último, copias en unidades de producción de material de propagación, como son huertos semilleros clonales o bancos clonales.

Sin duda, desde el punto de vista de la conservación de la diversidad y variabilidad genética, los ensayos de progenies son los más valiosos. En estos ensayos, tanto de especies nativas como exóticas, se encuentra representada la mayor parte de la distribución natural de las especies y presumiblemente la mayor variabilidad. Estos ensayos se constituyen en verdaderas Poblaciones Base, que son el punto de partida para programas de mejoramiento genético. Atendiendo a la alta variabilidad climática que posee Chile, los ensayos de progenie de especies nativas se han establecido a lo menos en 3 zonas representativas de la distribución de la especie, o en zonas ecológicamente compatibles para el caso de las especies exóticas. Con estas medidas se consigue, por un lado resguardar el material genético para propósitos presentes o futuros y, por otro, obtener información sobre procedencias u orígenes más adecuados para lugares específicos. En este contexto, las poblaciones base deben ser establecidas y monitoreadas con altos estándares de seguridad para su protección, como son cortafuegos, cercos y monumentaciones (para evitar la pérdida del diseño e identificación). Otro tema fundamental es la calidad de la información que arrojan estas poblaciones base y cómo estará disponible para continuar la investigación y utilizarla con fines productivos o de restauración.

La información que se recogerá en el sistema Grin-Global considerará el formato de banco (*in vivo* o *in vitro* o semillas, etc.) en que se encuentra cada individuo (árboles), de modo de brindar a los potenciales usuarios un acceso completo a la descripción del material representado.

Como se observa en el Cuadro N°1, las accesiones presentes en ensayos genéticos y clonales, consideran a cada individuo como un genotipo distinto, y por este mismo hecho de ser únicos, es necesario ingresar a cada uno por separado. En algunos casos existen árboles que fueron seleccionados por ciertas características, por lo que poseen un mayor grado de información y también pueden estar representados en algún otro formato de banco (*in vitro*, semillas, clon, etc.), situación que puede ser evidenciada con mayor facilidad al utilizar el sistema Grin-Global.

Cuadro N° 1
RESUMEN DE LOS BANCOS DE GERMOPLASMA DEL INSTITUTO
FORESTAL DE CHILE (INFOR)

Ex situ	Unidades (Especies y Accesiones) (N°)	Responsable
Ensayos Genéticos (Ensayos de progenies y ensayos clonales)	70 (24 especies, +70.000 accesiones)	INFOR Grupo de Conservación y Mejoramiento Genético
Bancos Clonales (En terreno y en vivero)	11 (9 Especies, 50 accesiones)	INFOR Grupo de Conservación y Mejoramiento Genético
Ensayos de Ganancias Genéticas	2 (2 especies, +100 accesiones)	INFOR Grupo de Conservación y Mejoramiento Genético
Ensayos de Procedencias	42 (22 especies, +500 accesiones)	INFOR Grupo de Conservación y Mejoramiento Genético
Banco <i>in vitro</i>	1 (8 especies, 96 clones (accesiones))	INFOR Grupo de Conservación y Mejoramiento Genético
Banco Micológico (Micorrizas y Saprófitos comestibles)	1 (39 especies, 343 accesiones)	INFOR Grupo de Conservación y Mejoramiento Genético

La decisión de considerar a cada individuo dentro de un ensayo como accesión proviene de tener en cuenta que la mayor parte del material seleccionado a través del mejoramiento genético, ya sea en poblaciones naturales o en ensayos de progenie de primera generación, corresponde a material silvestre, no a cultivares o variedades como es lo que comúnmente ocurre en los programas genéticos agronómicos, que son de larga data y en su mayoría ya cumplen con los principios de ser Distintos (a otros cultivares), Homogéneos (su descendencia repite las características) y Estables (al ser reproducidos mantiene las características que les son propias). Los árboles forestales difícilmente tienen ese grado de domesticación por lo cual es muy difícil determinar una sub-población a registrar en el sistema de administración Grin-Global. Adicionalmente, un ensayo de progenies, o población base como se les ha denominado, posee árboles que se destacan para distintos fines o productos, entonces la sub-población ya no será una sino una para cada característica que

se quiere destacar, por ejemplo, la sub-población de mayor volumen, la sub-población de mayor tolerancia a la sequía, la sub-población con mayor contenido de antioxidantes en los frutos, etc. Para conseguir un grado de selección como el anterior se requiere medir o evaluar un sinnúmero de variables con las que aún no se cuenta. Probablemente, en la medida que avancen los programas de mejoramiento genético de INFOR será posible acotar el acervo genético de algunas especies en función de las demandas nacionales.

Actualmente INFOR cuenta con bases de datos simples, correspondientes a planillas Excel, primero con información general de los ensayos genéticos (Cuadro N° 2) vinculados a otros archivos (Cuadro N° 3) que corresponden a base de datos con el detalle de cada árbol presente en el ensayo y sus evaluaciones. Mediante protocolos específicos de Grin-Global es posible traspasar en forma masiva desde el formato Excel (xls o xlsx) al formato Grin-Global.

Cuadro N° 2
EJEMPLO BANCOS *IN VIVO*

Predio (N°)	Predio	Especie	Año Plantación	Propietario	Superficie (ha)	Comuna Región	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Detalle Ensayo
2	El Monte	<i>E. viminalis</i>	1993	Forestal Tornagaleones	3,7	Los Lagos Los Lagos	39°48'	72°45'	..\Bases-G\ VIMINALI\ MONTE123.DBF
20	El Morro	<i>E. nitens</i>	1990	Forestal Mininco	5,2	Mulchén Bio Bio	37°55'	72°00'	..\Bases-G\ NITENS\ ELMORRO2001.xls
23	Coihue Sur	<i>E. nitens</i>	1996	Forestal Mininco	3,0	Mulchén Bio Bio	37°45'	72°06'	..\Bases Nuevas\ nitens\coihue1 procesado.xls
10	Los Hermanos	<i>E. globulus</i>	1989	Bosques Arauco	5,5	Los Álamos Bio Bio	37°41'	73°66'	..\Bases-G\ GLOBULUS\ HER12345.DBF

Al desplegar el archivo vinculado de cada base de datos se obtiene un ordenamiento actual como el que se presenta en el Cuadro N° 3.

Cada ID representa un árbol en el ensayo, a partir del primer árbol con que se inicia la ruta de medición. Adicionalmente existe un croquis de cada ensayo donde está claramente señalado el Norte, caminos de acceso y ruta de medición.

También existe un manual del ensayo donde, además de la identificación de origen de cada familia, se incluyen todas aquellas labores en el establecimiento y manejo del ensayo.

En el caso del Banco de Germoplasma *in vitro* las bases de datos son las representadas en el Cuadro N° 4.

Cuadro N° 3
BASE DE DATOS EVALUACIONES DE ENSAYOS DE PROGENIE

ID	BLOQUE	PROC	PROG	ARBOL	ALT1	DIAM1	VAR1	VAR2	VAR3	ALT2	DIAM2
100	1	1	9	1	0,4	0,5	1	0	0	0,6	0,9
101	1	1	9	2	0,4	0,4	1	0	0	0,6	0,9
102	1	1	9	3	0,4	0,4	1	0	0	0,6	1,1
103	1	1	9	4	0,4	0,4	1	0	0	0,6	0,8
104	1	1	8	1	0,7	0,5	1	0	0	0,8	1,0
105	1	1	8	2	0,6	0,6	1	0	0	0,7	1,2
106	1	1	8	3	0,6	0,8	1	0	0	0,8	1,1
107	1	1	8	4	0,6	0,8	1	0	0	0,8	1,1
108	1	1	3	1	0,4	0,4	1	0	0	0,6	0,8
109	1	1	3	2	0,5	0,5	1	0	0	0,7	1,2
110	1	1	3	3	0,4	0,4	1	0	0	0,5	1,3
....											
3779	8	16	183	4	0,5	0,5	1	0	0	0,8	0,9

ID: N° Identificación árbol Alt1 y 2: Altura en evaluaciones sucesivas
Bloque: N° Bloque Diam 1 y 2: Diámetro en evaluaciones sucesivas
Proc: N° Identificación Procedencia Var 1, 2 y 3: Variables auxiliares, referidas a sanidad, forma y otros

Cuadro N° 4
EJEMPLO BANCO *IN VITRO*

Especie	Clon	Copias (N°)	Fecha Ingreso	Código Original
<i>Nothofagus alpina</i>	3	15	03/1999	RA3
<i>Nothofagus alpina</i>	6	15	03/1999	RA6
<i>Nothofagus alpina</i>	7	15	03/1999	RA7
<i>Nothofagus alpina</i>	10	15	03/1999	RA10
<i>Castanea sativa</i>	4	15	07/2003	..
<i>Castanea sativa</i>	22	15	07/2003	..
<i>Nothofagus pumilio</i>	7	15	07/2005	..
<i>Nothofagus pumilio</i>	12	15	07/2005	..
<i>Nothofagus pumilio</i>	16	15	07/2005	..
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	2	15	07/2003	..
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	3	15	07/2003	..
<i>Eucalyptus globulus</i>	27	15	07/2007	..
<i>Eucalyptus globulus</i>	30	15	07/2007	..

Adicionalmente en el Banco *in vitro* se tiene un libro de registro de actividades diario donde se señala el trabajo con cada clon, medios utilizados, procesos realizados, operario que realizó el proceso y cualquier otra observación que contribuya a hacer un seguimiento para asegurar la fidelidad del material genético.

Un ejemplo de base de datos para el Banco de Micorrizas se presenta en el Cuadro N° 5.

Cuadro N° 5
EJEMPLO DE BASE DE DATOS PARA UN BANCO DE MICORRIZAS

Código Actual	Especie Probable	Sector	Región	Suelo	Especie Asociada	Mes Colecta	Edad Rodal (Años)
IF81001	<i>Lactarius deliciosus</i>	San José de Colico 1	Bio Bio	Franco Arcilloso	<i>Pinus radiata</i>	Mayo	12
IF81002	<i>Amanita muscaria</i>	San José de Colico 1	Bio Bio	Franco Arcilloso	<i>Pinus radiata</i>	Mayo	12
IF81003	<i>Lycoperdon</i>	San José de Colico 1	Bio Bio	Franco Arcilloso	<i>Pinus radiata</i>	Mayo	12
IF81004	<i>Amanita gemmata</i>	San José de Colico 1	Bio Bio	Franco Arcilloso	<i>Pinus radiata</i>	Mayo	12

Este banco, al igual que el banco *in vitro*, posee un libro de registros de actividades diarias para asegurar la identificación y la supervivencia del material genético.

La incorporación del sistema Grin-Global ha determinado que se recodifique el material genético de todos los bancos de INFOR. Previo a ellos se definieron los códigos principales que se refieren a la pertenencia del material y al tipo de banco (number_part1), el código en number_part2 corresponderá al número específico de la accesión que va del número 1 al 999999 (Cuadro N° 6).

Cuadro N° 6
SISTEMA DE CODIFICACIÓN PRELIMINAR DEL MATERIAL GENÉTICO DE INFOR

TIPO DE BANCO	Accession_			Identificación Accesión
	number_part1	number_part2	number_part3	
Semillas	INFOR A	1	SEED	INFOR A 000001, SEED
In vitro	INFOR B	1	IN VITRO	INFOR B 000001, IN VITRO
Ensayos Genéticos	INFOR C	1	TRIAL	INFOR C 000001, TRIAL
Bancos clonales, injertos	INFOR D	1	GRAF	INFOR D 000001, GRAF
Bancos clonales, estacas	INFOR E	1	CUTTING	INFOR E, 000001, CUTTING
Banco micorrizas, cepas	INFOR F	1	FUNGI	INFOR F, 000001, FUNGI
Banco Criopreservacion	INFOR G	1	CRIO	INFOR G, 000001, CRIO

Considerando que cada accesión que se suba al sistema Grin-Global incorporará información complementaria de acuerdo a los descriptores que se señalaron anteriormente, no se incluirán códigos que identifiquen por ejemplo a la especie. Anualmente se recolecta

material genético como semilla o ingresan incluso nuevas especies a los bancos, por lo mismo, se asignará un número correlativo a la accesión y no se prefijarán números por especie.

Actualmente se realizan consultas a otras instituciones nacionales e internacionales de modo de mejorar el método de asignación de códigos que se piensa implementar.

Dado que actualmente INFOR no cuenta con bases relacionadas de los distintos bancos la recodificación e incorporación de la información a la Plataforma Grin Global representará un trabajo importante, tanto para el poblamiento de la plataforma propiamente tal como para la captura de información faltante, por ejemplo georeferenciación, descripciones de sitio e incluso descripciones morfológicas del material genético.

CONCLUSIONES

Grin-Global es una poderosa y versátil herramienta de administración y documentación de colecciones de germoplasma y recursos genéticos, concebida para facilitar la utilización e intercambio de estos recursos por parte de los mejoradores.

La adopción de este sistema por parte del Instituto Forestal permitirá poner a disposición de la comunidad interesada completas y diversas colecciones de recursos forestales de alto valor productivo y de conservación, facilitando de esta forma el acceso a su datos a través de sistemas mundiales de información, los que en definitiva facilitarán también el acceso físico al germoplasma representado en esas colecciones y, por consiguiente, su uso por parte de la diversas instancias interesadas en su aplicación.

REFERENCIAS

Abadie, T. y Berretta, A., 2001. Caracterización y evaluación de recursos fitogenéticos. In Berretta y Rivas, coord. Estrategia en recursos fitogenéticos para los países del Cono Sur. procisur. Documentos. Montevideo, Uruguay. p 91-99.

Engels, JM. y Visser, L. (Eds.), 2007. Guía para el manejo eficaz de un banco de germoplasma. Manuales para Bancos de Germoplasma No. 6. Bioversity International, Roma, Italia.

FAO, FLD, IPGRI, 2004. Forest genetic resources conservation and management. Vol. 1: Overview, concepts and some systematic approaches. International Plant Genetic Resources Institute, Rome, Italy.

Ipinza, R., 2000. Modelo Básico de Mejora Genética. En: Ipinza, R.; Gutiérrez, B. y Emhart, V. (Eds.). Domesticación y Mejora Genética de Raulí y Roble. Universidad Austral e Instituto Forestal. Pp: 197-213.

Koskela, J.; Buck, A. and Teissier du Cros, E. (Eds.), 2007. Climate change and forest genetic diversity: Implications for sustainable forest management in Europe. Bioversity International. Rome, Italy. 111 p.

Ledig T., 1995. Conservación y Manejo de Recursos Genéticos Forestales. Actas: Seminario-Taller sobre Manejo de Recursos Genéticos Forestales realizado los días 11 y 12 de Abril de 1995 en la Universidad Autónoma Chapingo, México. Pp: 2-19.

Libby, WJ., 1987. Genetic resources and variation. En: Forest trees in improving vegetative propagated crops. Academic Press, New York, USA. Pp: 200-209

Marshall, DR. y Brown, AH., 1975. Optimum sampling strategies in genetic conservation. En: Frankel, OH. y Hawkes, JG. (Eds.). Crop Genetic Resources for Today and Tomorrow Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. Pp: 53-80.

Painting, K.; Perry, M.; Denning, R. y Ayad, W., 1993. Guía para la Documentación de Recursos Genéticos. IBPGR. Roma, 309 p.

Ulukan, H., 2008. Agronomic adaptation of some field crops: A general approach. J. Agron. Crop Sci., 194: 169–179.

Upadhyaya HD.; Gowda, CL. and Sastry, DV., 2008. Plant genetic resources management: collection, characterization, conservation and utilization. Journal of SAT Agricultural Research 6.

Yunbi, XU., 2010. Molecular Plant Breeding. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT), Mexico DF., Mexico. Pp: 1–38.







II. BIOTECNOLOGÍA Y PROPAGACIÓN DE EUCALIPTOS



7. LA PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE EUCALIPTOS EN CHILE

Teotônio Francisco de Assis¹
Francisco Rodríguez A.²

INTRODUCCIÓN

La experiencia en el uso de la clonación comercial de eucaliptos, tanto en Chile como en otros países, ha demostrado su gran importancia en el aumento de la productividad de los bosques y del mejoramiento de las propiedades tecnológicas de la madera para las más distintas finalidades. La adopción del concepto de bosques clonales, derivados de individuos superiores generados en los programas de mejoramiento basado en híbridos, ha sido uno de los factores responsables por el gran salto en productividad resultante del desarrollo de programas de mejoramiento genético en varios países.

La clonación presenta importantes ventajas en comparación a los métodos sexuales de reproducción y producción comercial de plantas. La primera se relaciona directamente con la magnitud de las ganancias transferidas a los bosques. Al permitir la captura de la varianza genética total (Zobel y Talbert, 1984), la clonación promueve la obtención de las máximas ganancias, en la productividad volumétrica, en la resistencia a factores bióticos y abióticos así como en las propiedades tecnológicas de la madera. La clonación ha sido aceptada como la forma más eficiente de aprovechar comercialmente la heterosis observada en los cruzamientos entre especies de *Eucalyptus* y tiene su mayor alcance en aquellas especies en las cuales los árboles adultos pueden ser rejuvenecidos y propagados vegetativamente a gran escala (Assis, 2000).

Como alternativa a la clonación, las empresas chilenas más importantes han usado la polinización controlada para tomar ventaja de la Aptitud Combinatoria Específica, reproduciendo en masa pares de cruces superiores (familias polinización controlada). Aunque teóricamente las familias de polinización controlada sean capaces de producir ganancias superiores a los huertos semilleros clonales, la explotación de la heterosis funcional (Lamkey, 1999), expresada en el nivel individual, tiene un mayor potencial para generar ganancias, tanto en crecimiento como en calidad de la madera y resistencia a factores bióticos y abióticos.

La hibridación interespecífica en *Eucalyptus*, por otra parte, es la manera más rápida de generar ganancias genéticas, y la clonación es la forma más eficaz para incorporar estos beneficios de la hibridación a los procesos de producción industrial. Una búsqueda de la complementariedad de las características tecnológicas de la madera, la tolerancia al estrés biótico y abiótico y la manifestación de heterosis, observada en varios cruzamientos híbridos, ha sido utilizada como forma de producir individuos superiores. En Chile el híbrido más comúnmente utilizado se produce en el cruzamiento entre *E. nitens* y *E. globulus*, donde se busca combinar las características de crecimiento y resistencia al frío de *E. nitens*, con la alta calidad de la madera para pulpa de *E. globulus*.

1 Assistech Ltda. assisteo@terra.com.br

2 Forestal Mininco. francisco.rodriguez@forestal.cmpc.cl

Así como en la mayoría de cruces interespecíficos, el híbrido *E. nitens* x *E. globulus* genera progenies heterogéneas, por lo que la transferencia de ganancias genéticas a los bosques es dependiente de la existencia de métodos funcionales de la clonación a gran escala. Además, las familias híbridas en muchos tipos de cruzamientos pueden presentar altos niveles de anormalidades (Griffin *et al.*, 2000), lo que hace la clonación imprescindible en el rescate y multiplicación de los individuos superiores que se encuentran en estas familias. Por lo tanto, la clonación, como una herramienta para la aplicación de la silvicultura clonal, es el complemento técnico ideal para maximizar los beneficios de la hibridación en el contexto de la producción de bosques para fines industriales.

PRINCIPALES PROBLEMAS Y DIFICULTADES ASOCIADAS A LA CLONACIÓN DE EUCALIPTOS EN CHILE

Factores Genéticos

Existe amplia evidencia de que la formación de raíces adventicias en estacas está genéticamente controlada (Assis y Teixeira, 1998). La gran variación observada entre las especies, variedades y clones, con respecto a la capacidad natural más o menos fácil para formar raíces en estacas ha puesto de manifiesto la importancia de los factores genéticos en el enraizamiento.

En general, las especies de climas subtropicales y templados se encuentran entre las más difíciles de propagar por medio de la clonación. Por ejemplo, especies tales como *E. nitens*, *E. dunni*, *E. benthamii*, *E. viminalis*, y en nivel algo menos complicado, *E. globulus*, se consideran recalcitrantes a la clonación por enraizamiento de estacas. De alguna manera esto ha dificultado la adopción generalizada de la clonación a escala comercial para las especies más adaptadas a Chile. La mayor dificultad presentada por estas especies es la velocidad con que reducen e incluso pierden la capacidad de enraizamiento, sobre todo debido a factores fisiológicos relacionados con la maduración. Además de la variación entre las especies, la tasa de pérdida de la capacidad de enraizamiento también varía entre individuos de la misma especie, por lo que el proceso de selección por enraizamiento es fundamental en el establecimiento de programas de silvicultura clonal.

Estacionalidad en el Enraizamiento

En adición a la propia dificultad intrínseca de la clonación, el clima predominantemente frío se convierte en una complicación adicional en el proceso de enraizamiento de las especies más plantadas en Chile. Las marcadas diferencias entre las estaciones que se encuentran en el país, especialmente con respecto a la temperatura y el fotoperíodo, son factores que promueven cambios negativos en la predisposición de las plantas a enraizar. Efectos estacionales muy marcados son comunes y se observan incluso en ambientes tropicales (Hartney, 1980). Los períodos de otoño e invierno, donde las plantas tienden a entrar en estado latente, son los principales desafíos en el logro de niveles adecuados de enraizamiento en Chile durante el ciclo de un año.

Factores Fisiológicos

Además del efecto del genotipo, los factores más importantes para conseguir niveles adecuados de enraizamiento son la juvenilidad y el estrés. El envejecimiento, o la madurez fisiológica, es un fenómeno que afecta a las plantas leñosas y es común en el género

Eucalyptus. Materiales juveniles generalmente enraízan adecuadamente, pero pierden la capacidad para formar raíces en propágulos en la medida en que aumenta el número de divisiones celulares de los meristemos apicales.

En muchas especies y clones la madurez fisiológica puede hacer inviable el uso de la clonación, imposibilitando su aplicación comercial (Franclet, 1982).

Por otra parte, las condiciones de estrés verificadas en el manejo de la producción de propágulos, así como en su manipulación, tienen una gran influencia sobre las pérdidas incurridas en el proceso de enraizamiento de estacas.

En la optimización de producción de plantas en algunos viveros operacionales se ha comprobado que los ajustes para reducir el estrés pueden provocar ganancias en el enraizamiento de 10 a 30 puntos porcentuales, dependiendo del nivel en que se encuentran los viveros y de las medidas de control practicadas en el manejo de setos y estacas. Las medidas son generalmente de bajo costo y fáciles de implementar, pero generan resultados significativos. Para ello solo se debe tener en cuenta que lo que se busca es la reducción de los niveles de estrés al que las plantas y las estacas son sometidas.

- **Juvenilidad, Madurez y Rejuvenecimiento**

Normalmente se considera el período juvenil como aquel comprendido entre la germinación y el momento en que la planta alcanza la capacidad de florecer. La adquisición de la capacidad reproductiva es, entonces, el límite final de la etapa juvenil y el inicio de la etapa de adulto joven. Sin embargo, los cambios morfológicos y fisiológicos relacionados con este cambio de fase no se producen de repente en un cierto momento de la vida de la planta, sino más bien gradualmente desde el inicio de la germinación. Estos cambios pueden afectar ciertos factores de modo mucho más temprano tales como el enraizamiento, por ejemplo, donde la predisposición a enraizar puede durar un par de días en algunas especies, o años en otras.

Así, desde el punto de vista de la propagación clonal, juvenilidad es el período en el que la planta tiene una alta capacidad de enraizamiento. Toda la planta muy juvenil tiene una alta predisposición a enraizar y, generalmente, presenta pérdida de la capacidad de enraizamiento en la medida que progresa su crecimiento apical; esta pérdida puede ocurrir dentro del mismo período considerado juvenil. Paton y Willing (1974), encontraron que el enraizamiento de *E. grandis* cae desde el nodo 14°, pero en otras especies se observa la caída desde una altura de 30 cm, incluso en plantas juveniles.

El proceso de maduración es un fenómeno que suele afectar a las especies leñosas de acuerdo con su desarrollo ontogenético. Una de las consecuencias más importantes del envejecimiento ontogenético es la disminución e incluso la pérdida de capacidad de enraizamiento observado en plantas adultas. Este hecho es relevante en la propagación de especies forestales, dado que los árboles se evalúan adecuadamente solo cuando son adultos y han perdido la capacidad de enraizar. La pérdida gradual de la capacidad de enraizamiento que ocurre con el envejecimiento ontogenético, promueve la expresión de otro factor fisiológico llamado topófisis. La topófisis provoca que propágulos procedentes de diferentes puntos en la planta tengan distintas características fisiológicas, resultando en diferentes capacidades de enraizamiento de acuerdo con la posición de la estaca en la rama.

La capacidad de enraizamiento es menor en los extremos de las ramas, pero sigue siendo elevada en los tejidos del cuello de la planta y de lugares adyacentes.

En algunos casos, en materiales menos juveniles a veces se puede lograr enraizamiento, pero la calidad del sistema de raíces puede ser defectuosa, dando lugar a heterogeneidad de crecimiento e impidiendo la expresión del potencial genético de los clones. Este fenómeno puede convertir árboles seleccionados superiores en clones de *performance* o desempeño mediocre. Por lo tanto, no tan solo las raíces, sino también la calidad del sistema radicular deben ser conocidas en las especies en las que se trabaja. Debe evaluarse como la topófisis afecta el enraizamiento y la calidad del sistema radicular, ya que algunas especies y clones son más sensibles a este fenómeno que otros.

De la misma manera que las especies de *Eucalyptus* maduran y pierden su capacidad para formar raíces, la mayoría de las especies puede ser rejuvenecida. El conocimiento del fenómeno de retención de la juvenilidad en los tejidos de la base del tallo de plantas obtenidas a partir de semillas, permitió el establecimiento de un modelo básico, ya ampliamente aplicado en la clonación de eucaliptos.

Este modelo consiste en la obtención de brotes a partir de la base de los árboles, principalmente a través de su cepa, o el uso de técnicas tales como el anillado, la aplicación de sustancias reguladoras del crecimiento, el uso de fuego localizado y otras prácticas. Los brotes que surgen en esta región tienden a presentar características morfológicas y fisiológicas juveniles, incluyendo el enraizamiento. Por lo tanto, en general, la inducción de brotes en la base del árbol es capaz de restaurar la capacidad de enraizar en las plantas adultas (Hartney, 1980).

Hay varias otras formas de rejuvenecimiento, como la micropropagación, injertos en cascada, obtener brotes epicórmicos en las ramas de la copa del árbol, y otras. Sin embargo, la inducción de brotes basales es la forma más simple de rejuvenecimiento, aunque sólo se puede aplicar a especies que brotan después del corte.

- Estrés

Los procedimientos de manejo también afectan las condiciones de estrés a las que se someten las plantas. Las condiciones de estrés típicamente causan reacciones de las plantas en el sentido de sobrevivir a la acción de estos factores estresantes. Las plantas sometidas a condiciones estresantes generan mecanismos de supervivencia, y las respuestas más comunes a este estrés son la producción de ácido abscísico y de etileno. En condiciones de estrés las plantas tienden a perder sus hojas para mantenerse con vida. Esto se debe a la producción de ácido abscísico, que es responsable de la coloración amarillenta y enrojecimiento de las hojas, culminando con su caída prematura. Estacas sin hojas son más difíciles de enraizar. Además, estas dos sustancias son inhibitoras del enraizamiento, causando la formación de callo y muy pocas raíces. Por lo tanto, la reducción o eliminación del estrés es un factor importante para mejorar los resultados operativos de enraizamiento.

Las principales fuentes de estrés que se producen en la administración de setos y mini setos generalmente son de carácter nutricional, térmico e hídrico. En el manejo de las plántulas, la condición de estrés más importante es la hídrica, aunque la temperatura alta es una condicionante de estrés por sequía. Por lo tanto, el manejo adecuado de los brotes,

especialmente en la prevención de pérdida de agua desde su cosecha hasta su instalación en el interior de los invernaderos, debe ser un objetivo que siempre debe perseguirse.

POSIBLES OPORTUNIDADES DE MEJORAMIENTO PARA EL ENRAIZAMIENTO DE ESPECIES DE CLIMAS SUBTROPICALES Y TEMPLADOS

Sistemas de Propagación

La técnica de propagación que dio origen al concepto de silvicultura clonal fue desarrollada a partir del enraizamiento de estacas (Campinhos e Ikemori, 1980). Aunque más rústico, el uso de macro estacas es una técnica en desuso debido a las diversas ventajas que ofrecen las nuevas tecnologías de clonación, sobretodo las mini estacas. Estas ventajas son de carácter técnico, pero también pueden ser económicas, porque estos sistemas cuando están bien establecidos tienen mayores productividades.

Esta técnica, creada y desarrollada en Brasil en los años 90 (Assis *et al.*, 1992; Xavier y Comério, 1996), sustituyó por completo el uso de macro estacas. La mini estaca tiene importantes ventajas respecto del uso de macro estacas. Además de los beneficios operativos, técnicos y económicos hay ganancias ambientales, de ergonomía y de calidad. Operacionalmente, la mini estaca requiere menos mano de obra, por la eliminación de manejo extensivo requerido en el manejo de jardines de setos de campo, que fueran sustituidos por un manejo intensivo en mini jardines clonales de setos *indoor*. Por otra parte, la recolección y el transporte de los brotes, a menudo trasladados desde el campo, fueron sustituidos por la administración centralizada en el propio vivero y la aplicación de hormonas de enraizamiento se hizo innecesaria en la mayoría de los clones. En la mini estaca, la predisposición al enraizamiento es significativamente superior a la estaca de macro propagación y puede permitir sobrepasar el 40% de enraizamiento en clones normalmente recalcitrantes, debido principalmente al mayor grado de juvenilidad de los brotes. Además, las miniestacas enraízan más rápidamente, optimizando la utilización de las estructuras de propagación.

Además del mayor nivel de éxito asociado al uso de este tipo de estacas y su relación con una mayor juvenilidad, el mayor potencial de enraizamiento también está relacionado con un manejo más adecuado. El mejor resultado, obtenido mediante el uso de estas técnicas, también puede asociarse al menor grado de lignificación de los propágulos. Al compararse con las macro estacas, las mini estacas pueden ser consideradas más herbáceas, evitando las dificultades asociadas al excesivo aumento de la concentración de lignina en los tejidos.

En Chile, se observa actualmente una transición de los sistemas de propagación, con una migración a la mini estaca. Clones chilenos han sido ensayados en Brasil, utilizando protocolos desarrollados para el enraizamiento de especies subtropicales, demostrando que el sistema de mini estacas puede adoptarse con éxito y ofreciendo ventajas respecto del uso de macro estacas tradicionales. Además, estos resultados indican que cambios en los ambientes de cultivo de las plantas madre y las instalaciones para enraizamiento (temperatura más alta y mayor fotoperiodo), pueden ser importantes para obtener mejores resultados operativos en Chile.

Para obtener resultados satisfactorios durante el proceso de enraizamiento, debe existir un adecuado control de las condiciones ambientales, particularmente la humedad, la temperatura y la luz. El uso de invernaderos más protegidos y con control ambiental asegura

la reducción de los factores de estrés durante la fase de enraizamiento y mejora así el aprovechamiento final de las plantas.

La producción de propágulos a la intemperie, utilizada en algunos viveros operativos, puede hacer que el sistema de producción de brotes sea vulnerable en diversos momentos durante una temporada de producción. Esto hace que los resultados observados en este tipo de instalación sean inferiores a los obtenidos en alternativas más eficientes, tales como el manejo de mini setos en mini jardines de setos, sistema de producción de propágulos utilizado para la producción de mini estacas. El propio manejo de las plantas madre en los mini jardines clonales, donde la poda es siempre más baja, promueve mayor juvenilidad y también mayor homogeneidad fisiológica de los brotes. Esta mayor homogeneidad proporciona una mayor uniformidad en el comportamiento intraclonal en el campo, lo que podría afectar la productividad de algunos clones de manera positiva.

La obtención de un adecuado estado nutricional de las plantas madre es mucho más viable en sistemas hidropónicos apoyados en algún tipo de sustrato. Además de los aspectos técnicos, la mejor condición ergonómica para los trabajadores durante la cosecha de estacas y manejo de los setos puede constituir un diferencial de calidad, y también puede ser importante en los procesos de certificación. Los jardines clonales de campo son más propensos a producir propágulos con enfermedades. Es sabido que muchos hongos patógenos que afectan el enraizamiento (excepto *Botrytis*) son hongos del suelo, como *Cylindrocladium* y *Rizoctonia*. Salpicaduras de partículas de suelo producidas por el agua de lluvia o de los sistemas de riego, contaminan las estacas con hongos del suelo que quedan sobre las hojas de las plantas. Existen, por lo tanto, ventajas fitosanitarias en la adopción de un sistema de producción de propágulos más limpio.

Control de Temperatura y Fotoperiodo

El uso de calor y manejo de la luminosidad, especialmente para alterar el fotoperiodo y para cambiar la actividad metabólica, constituyen medidas que pueden ser utilizadas para reducir o eliminar los efectos estacionales sobre el enraizamiento. Luz y temperatura son factores que pueden ser controlados en los mini jardines clonales para mejorar la predisposición de las mini estacas al enraizamiento.

La luz puede ser manejada alterando el fotoperiodo y la intensidad luminosa. La mayor intensidad de luz puede aumentar la productividad de mini estacas, mientras que una menor intensidad de luz puede aumentar el enraizamiento por la reducción de sustancias fenólicas que actúan como inhibidores de enraizamiento (Vieitez y Ballester, 1988). Estas sustancias fenólicas también pueden actuar como promotores de enraizamiento, dependiendo de su naturaleza, concentración en los tejidos y especies implicadas. El fotoperíodo, especialmente si se combina con la temperatura, puede cambiar la predisposición para el enraizamiento. Estos factores utilizados en conjunto proporcionan las condiciones ambientales más importantes para el crecimiento y desarrollo de plantas madres, reduciendo los efectos estacionales sobre el enraizamiento en ambientes subtropicales.

Algunos eucaliptos responden positivamente a la reducción o eliminación temporal de la luz en plantas madres. Este es el caso del híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, en que el cultivo de las plantas madre en ambiente sombreado incrementó el enraizamiento en unos 20 puntos porcentuales, en comparación con las plantas madres desarrolladas a plena

luz. La utilización de luz suplementaria también puede influir en el enraizamiento mediante mecanismos que afectan el control interno de los niveles de hidratos de carbono. Las plantas madres desarrolladas bajo semisombra pueden ver afectado su porcentaje de enraizamiento, como también el número de raíces generadas, valores que dependiendo de la especie, pueden aumentar o disminuir (Hansen, 1987). Esta variación parece estar relacionada con la producción de hidratos de carbono (Nanda *et al.*, 1971) y con el transporte y acumulación de auxinas (Hansen, 1987).

La temperatura puede influir en el enraizamiento, al interferir con la absorción y el metabolismo de nutrientes y su control, especialmente en ambientes tropicales, y puede ser ajustada para obtener la máxima producción de plantas. Se ha observado que el periodo apto para enraizar estacas se reduce en otoño e invierno, pero que esta reducción se puede revertir mediante el aumento del fotoperiodo (14h/1000 lux), y el incremento de la temperatura en el ambiente de crecimiento de plantas madres ($> 20^{\circ} \text{C}$). Estos dos factores no se evaluaron por separado y su efecto individual no fue determinado. Sin embargo, considerando que la concentración de nutrientes en los tejidos es de suma importancia en el proceso de enraizamiento y que su absorción depende de la actividad metabólica, se puede suponer que ambos factores contribuyeron a la restauración de los niveles normales de enraizamiento.

En general, en las zonas con climas fríos, el período de enraizamiento se limita a los meses más cálidos del año. Así, como se discutió anteriormente, si la luz y la temperatura se controlan en la infraestructura de propagación, entonces se puede ampliar el período de enraizamiento a lo largo de todo el año y optimizar el proceso.

Explotación de la Máxima Juvenilidad

Los lignotubers son estructuras de reserva, presentes en la mayoría de las especies de eucalipto y son formados a partir de las axilas de los cotiledones. Estas estructuras son ricas en yemas vegetativas y son importantes para la supervivencia de las especies de *Eucalyptus* que los poseen. Normalmente los brotes resultantes de estos tubérculos leñosos son los que tienen las características morfológicas y fisiológicas más juveniles dentro de la planta de eucalipto. Este hecho fue comprobado por Pryor y Willing (1963), donde brotes obtenidos mediante la activación de yemas durmientes de los lignotubers presentaron características juveniles. Por otro lado partes aéreas juveniles fueron obtenidas a partir de lignotubers y de yemas adyacentes en *E. ficifolia* (Malazewski y Hackett, 1979), cuyo enraizamiento fue siempre superior a los brotes originados en otras partes de la planta.

Hipotéticamente es posible generar clones de las especies recalcitrantes utilizando propágulos provenientes de la zona del lignotuber. Esta hipótesis fue probada en *Corymbia citriodora*, especie difícil de enraizar, donde en un experimento se cultivó y podó 100 plantas juveniles como plantas madre para mini jardín clonal, con la finalidad de que emitieran brotes a partir de los tubérculos leñosos. Los brotes se enraizaron para cada planta por separado y se evaluó la capacidad de enraizamiento de cada una de ellas. Los resultados de esta evaluación indicaron que 74% de las plantas enraizaron en un 100%. Sobre la base de estos resultados preliminares, se revisó si los brotes de las plantas adultas, emitidos a partir de los tubérculos leñosos de *C. citriodora*, verían también afectada positivamente su capacidad de enraizamiento. Los resultados mostraron que hubo árboles de los que se obtuvo más de 60% de enraizamiento, lo que indica que el uso de esta técnica puede determinar la posibilidad de usar esta especie en plantaciones clonales.

Basado en esto, se recomienda como método estándar para el rescate de material a clonar, la cosecha de brotes a partir de la región del lignotuber, para las especies de *Eucalyptus* que poseen estas estructuras. Ciertamente esta medida contribuirá a la obtención de mayores niveles de enraizamiento y a la reducción de la pérdida de clones descartados del programa de mejoramiento genético por bajo enraizamiento. Si los árboles maduros de *C. citriodora* pueden ser propagados por brotes de tubérculos leñosos, el concepto fisiológico de la juvenilidad parece aplicarse a todas las especies. Esta técnica puede ser recomendada para árboles adultos de *E. globulus*, *E. nitens*, *E. dunni* y sus híbridos, así como para otras especies recalcitrantes que produzcan tubérculos leñosos. Los brotes derivados directamente de los tubérculos leñosos deben ser inducidos a partir de los cortes de los árboles seleccionados a una altura de 5 a 10 cm por encima de la menor profundidad de inserción de las raíces. Esto obligará a la emisión de los brotes directamente desde el lignotuber, o zonas adyacentes. Como la región del lignotuber está situada cerca del cuello, en la mayoría de los casos se encuentra bajo la superficie del suelo. Por lo tanto, antes de realizar la inducción de la brotación es necesario retirar una capa de tierra vegetal para exponer el lignotuber. De lo contrario los brotes se emitirán desde puntos por sobre el lignotubérculo.

Cuando los brotes alcanzan el tamaño de estacas tradicionales, los esquejes deben ser cortados y transportados cuidadosamente, para su instalación en invernadero de enraizamiento. Se recomienda utilizar solo estacas de primer y segundo orden (primer y segundo par de hojas) en el proceso de rescate. Esto ayudará a no perder los brotes juveniles obtenidos a partir de los tubérculos leñosos, lo que tiende a perpetuarse en las sucesivas etapas de propagación, incluso para uso comercial.

Sistema de Colecta, Embalaje y Transporte de Brotes

Para cosechar brotes en los rescates desde el campo, especialmente en períodos calurosos y secos, se ha utilizado un método simple, pero muy eficaz, para la preservación del agua interna de los propágulos. Este sistema consiste en envolver los propágulos colectados en toallas de papel humedecidas y colocarlos dentro de recipientes de plástico con tapas. Posteriormente estos recipientes se colocan dentro de cajas de poliestireno con hielo en su parte inferior, a objeto de mantener la temperatura baja. Mediante este método se puede mantener los brotes en buen estado durante largo tiempo.

Es esencial mantener la turgencia de los propágulos hasta su instalación en el interior de los invernaderos. Como se mencionó anteriormente, el estrés hídrico induce la formación de etileno y ácido abscísico. Para la producción de etileno la estaca utiliza sus reservas de carbono, lo que deriva en la reducción de los contenidos internos de hidratos de carbono. Mientras que el ácido abscísico puede causar la caída de las hojas e inhibir el enraizamiento, promoviendo la formación de callos en la base de las estacas. Cualquier esfuerzo por mantener los brotes turgentes es positivo en el proceso de enraizamiento. Estas observaciones son importantes para el trabajo rutinario de enraizamiento y el mismo cuidado debe ser puesto en la cosecha de estacas y miniestacas en la producción operacional de plantas vía propagación vegetativa. Antes de cosechar las estacas o mini estacas, sus hojas deben ser rociadas con agua para reducir la temperatura de su superficie, y disminuir su transpiración.

Mejoramiento de Atributos Genéticos

Cuando dos especies con bajo nivel de enraizamiento se cruzan, los híbridos

generados tienden a mantener la misma limitación. La mera inclusión de una especie de fácil enraizamiento en el cruzamiento es suficiente para aumentar tanto el promedio de enraizamiento de la crucea como la cantidad de material enraizable. A continuación se presenta dos ejemplos que ilustran este hecho: *Corymbia citriodora* casi no enraíza, sin embargo produce plantas clonables cuando se cruza con *Corymbia torelliana*. Una situación similar se observa en el cruce entre *Eucalyptus urophylla* y *E. globulus ssp. maidenii*. La subespecie *maidenii* es difícil de enraizar, pero produce híbridos clonables cuando se cruza con *E. urophylla* (Assis, 2000). Hay otros ejemplos en el incremento del porcentaje de enraizamiento con esta estrategia. Por ejemplo, *E. dunnii* tiene baja cantidad de clones con buen enraizamiento, mientras que *E. viminalis* se considera altamente recalcitrante, casi imposible de ser clonado comercialmente con las tecnologías actuales. Cruzas desarrolladas a partir de *E. dunnii* y *E. viminalis* con *E. grandis*, *E. urophylla* y con el híbrido *E. urophylla* x *E. grandis*, han presentado plantas con suficiente potencial de enraizamiento para su uso en programas de clonación a escala comercial.

Debido a que es relativamente resistente al frío y su madera genera celulosa de buena calidad, *Eucalyptus cypellocarpa* puede ser una excelente opción para mejorar las características de enraizamiento. Esta especie tiene altos niveles de enraizamiento (Balocchi³) y se puede utilizar en la generación de híbridos con este atributo.

El uso de clones de élite en los programas de mejoramiento de especies puras y también en los programas de hibridación, ofrece la oportunidad de escoger, para la recombinación, clones de mayor capacidad de enraizamiento, lo que debería contribuir a la mejora de la predisposición a clonación de los materiales genéticos en las generaciones futuras. De esta forma, la inclusión de especies o clones de fácil enraizamiento en los programas de cruces controladas puede ser una medida positiva en la mejora de los resultados de clonación de híbridos entre especies de difícil enraizamiento en Chile.

Exploración del Efecto Materno

La capacidad de enraizamiento es una función que muestra un efecto maternal. Cuando la especie de mejor enraizamiento se usa como el progenitor femenino, los promedios de enraizamiento son superiores al compararse con los cruzamientos recíprocos. Además de aumentar las tasas promedio de enraizamiento, la explotación del efecto materno también promueve un aumento en la cantidad de plantas individuales con alto enraizamiento. Este fenómeno se ha observado en los cruzamientos entre especies diferentes y parece ser estándar para los géneros *Eucalyptus* y *Corymbia*.

Según Assis (2000) los cruces de *E. urophylla* x *E. globulus ssp. maidenii* tienen mayores tasas promedio de enraizamiento que su recíproco *E. globulus ssp. maidenii* x *E. urophylla* y también más individuos que alcanzaron índices operacionales de enraizamiento. Esta misma tendencia se observó en los cruces entre *C. citriodora* y *C. torelliana*. Cuando *C. torelliana*, la especie de mayor enraizamiento, se utilizó como madre, el promedio de enraizamiento y la cantidad de individuos clonables aumentó. Aparentemente hay alguna herencia pasada a través del citoplasma, pero casi no hay informaciones sobre este tema en especies de eucaliptos.

3 Claudio Balocchi, 2009 - Comunicación personal.

En el Cuadro N° 1 se presentan resultados operacionales de enraizamiento de los cruzamientos recíprocos de estas dos especies.

Cuadro N° 1
EFFECTO DE LOS CRUZAMIENTOS RECÍPROCOS ENTRE *C. citriodora* Y *C. torelliana* SOBRE EL ENRAIZAMIENTO OPERACIONAL DE LOS CLONES HÍBRIDOS

Clones	Cruzamiento	Estacas (N°)	Estacas Enraizadas (N°)	Enraizamiento (%)
M-1	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	1032	170	16,47
M-4	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	8600	3605	41,91
M-7	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	6020	2625	43,60
M-22	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	3440	1155	33,57
M-43	<i>C. torelliana</i> x <i>C. citriodora</i>	2580	1015	39,34
M-44	<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	516	70	13,56

El enraizamiento promedio de los clones de *C. citriodora* x *C. torelliana* fue de 21,2%, mientras de *C. torelliana* x *C. citriodora* fue de 41,61%, por lo tanto el doble del enraizamiento promedio del cruzamiento recíproco. Con la utilización de rescates vía lignotuber la tendencia es que el enraizamiento se eleve significativamente en los dos tipos de cruzamientos, pero las ventajas de utilizar *C. torelliana* como madre deberán permanecer.

En la actualidad, los híbridos generados entre *E. nitens* y *E. globulus* en Chile han utilizado *E. nitens* como madre. Como se sabe, *E. nitens* es más difícil de enraizar que *E. globulus*, lo que hace que sus híbridos también sean de difícil clonación. En este caso el efecto materno puede ser manejado con el fin de producir plantas con mayor facilidad de enraizamiento, utilizando *E. globulus* como madre. Para ello es necesario romper la barrera de la incompatibilidad anatómica presentada por las diferencias en los tamaños de tubos polínicos de las dos especies.

Control de Estrés

En la etapa de producción de propágulos, los principales factores que generan estrés para las plantas son la nutrición, el riego, la salinidad y la temperatura. Como medidas de prevención del estrés en la producción de plántulas, se debe mantener un buen sistema de fertilización, con seguimiento periódico de la situación nutricional de los setos o mini setos, para la resolución de los desequilibrios y la reposición de los nutrientes que se encuentran por debajo de los niveles adecuados, o la reducción de los que están por arriba de esos niveles. Es necesario contar con infraestructura donde al menos se pueda controlar la temperatura, así como tener un sistema de riego eficiente.

La desalinización periódica de camas y, adicionalmente, en la víspera de las cosecha de estacas, es necesaria para asegurar mayores niveles internos de agua. La formación de costras de sal en la superficie de los canteros en los mini jardines clonales, es una causa importante de pérdidas de la sobrevivencia de mini estacas. A menudo, las plantas se presentan marchitas, pese a tener el sustrato saturado de humedad, y las estacas cosechadas no estarán en su máximo de turgencia, lo que contribuye a la pérdida de la supervivencia en el periodo de enraizamiento. Una vez a la semana, o como máximo cada 15 días, se

deben desalinizar los canteros haciendo un lavado con el uso abundante de agua de baja conductividad eléctrica.

En la etapa de cosecha, embalaje y transporte de estacas también son importantes los aspectos relacionados el potencial hídrico del material, que pueden verse afectados por las altas temperaturas y la baja humedad relativa del aire. Además, el tiempo que transcurre entre la cosecha e instalación de las estacas contribuye a la aparición de estrés y reduce el enraizamiento. En días muy calurosos el uso de semisombra sobre los canteros y la pulverización de agua sobre las hojas de los mini setos ayuda a reducir la temperatura y por lo tanto la transpiración. En esta fase, y como forma de prevenir la ocurrencia de estrés, deben ocuparse embalajes adecuados, en los cuales se pueda almacenar temporalmente las estacas y evitar la pérdida de agua.

Debe realizarse el rociado con agua de los materiales siempre que sea necesario, manteniendo los propágulos protegidos de las altas temperaturas, del viento y del sol. Reducir al mínimo los tiempos de almacenamiento de las estacas contribuirá a evitar el estrés y mejorar el enraizamiento de los materiales utilizados. Idealmente el tiempo que transcurra entre la cosecha y la instalación de las mini estacas debe ser menor a media hora. Posteriormente, el uso de equipamiento que permita mantener protegidas las bandejas con estacas durante sus traslados hacia las áreas de enraizamiento, así como contar con agua de pulverización para mantener la turgencia, son medidas benéficas.

En los invernaderos, las causas de estrés más común están relacionadas con el riego heterogéneo, originado por deficiencias de dimensionamiento del sistema de asperjado de agua en su interior. Se generan zonas diferenciadas dentro de los invernaderos, donde la insuficiente de agua en algunos puntos o el exceso en otros, causa daños al proceso.

Otro factor que genera zonas diferenciadas dentro de los invernaderos es la obstrucción de boquillas. Una forma de prevenir el estrés en los invernaderos es proyectar adecuadamente el sistema de riego, eliminar zonas preferenciales y realizar inspecciones frecuentes para destapar boquillas. Debe contarse con un adecuado sistema de filtros en la entrada de agua para reducir los eventos de obstrucción. Los ajustes en el sistema de irrigación son importantes para aumentar la supervivencia y el enraizamiento.

Las estructuras físicas utilizadas para la clonación deben contar con al menos un nivel de control de temperatura, humedad y luz. Durante los primeros días dentro de los invernaderos, las mini estacas son más susceptibles a la pérdida de humedad, sobre todo en los períodos más cálidos del año. La provisión de semisombra durante los primeros siete a diez días posteriores a la instalación de las estacas es beneficiosa para reducir el estrés.

Realizar el seguimiento dentro de los invernaderos para identificar las causas de la pérdida de mini estacas es importante para descubrir la razón de la reducción de la supervivencia. Los agentes causales que van surgiendo pueden proporcionar la información necesaria para su eliminación o reducción.

REFERENCIAS

Assis, T. F.; Teixeira, S. L., 1998. Enraizamento de Espécies Lenhosas. In: Torres, A.C.: Caldas, L.S.: Buso, J.A. Eds. Cultura de Tecidos e Transformação Genética de Plantas. Brasília: Embrapa-SPI/Embrapa-CNPq. Pp: 261-296.

Assis, T. F.; Rosa, O. P.; Gonçalves, S. I., 1992. Propagação Clonal de *Eucalyptus* por Microestaquia. In: Congresso Florestal Estadual, 7. Nova Prata, Anais. Santa Maria: UFSM. Pp: 824-837.

Assis, T. F., 2000. Production and Use of *Eucalyptus* Hybrids for Industrial Purposes. In: Hybrid Breeding and Genetics of Forest Trees. Dungey, H. S., Dieters, M. j. and Nikles, D. J. (Compilers). Proceedings of QFRI/CRC-SPF Symposium, 9-14 April 2000, Noosa, Queensland, Australia. (Department of Primary industries, Brisbane). Pp: 63-75.

Campinhos, E.; Ikemori, Y. K., 1980. Mass-Production of *Eucalyptus* Species by Rooting Cutting. *Silvicultura* 8: 770-775.

Franclet, A., 1982. Rejuvenation Theory and Practical Experiences in Clonal Silviculture. In: Clonal Forestry: Its Impacts on Tree Improvement and our Future Forests. Meeting of the Canadian Tree Improvement Association. Toronto. Proceedings... Toronto, 1982. p. 96-134.

Griffin, R.; Harbard, J.; Centurion, C.; Santini, P., 2000. Breeding *Eucalyptus grandis* x *globulus* and other Inter-Specific Hybrids with High Inviability – Problems Analysis and Experience at Shell Forestry Projects in Uruguay and Chile. In: Hybrid Breeding and Genetics of Forest Trees. In: Dungey, H. S.; Dieters, M. J.; Nikles, D. J. (Compilers). Proceedings of QFRI/CRC-SPF Symposium, Noosa, Queensland, Australia. (Department of Primary industries, Brisbane). Pp: 1-13.

Hansen, J., 1987. Stock Plant Lighting and Adventitious Root Formation. *Hort. Science*, v.22, n.5: Pp: 746-749.

Hartney, V. J., 1980. Vegetative Propagation of the *Eucalyptus*. *Australian Forest Research* 10: 191-211.

Lamkey, K. R., 1999. Quantitative Genetics of Heterosis. In: ASA-CSSA-SSSA (Ed.). The Genetics and Exploitation of Heterosis in Crops. Madison. Pp: 31-43.

Malazewski, R. L.; Hackett, W. P., 1979. Cutting Propagation of *Eucalyptus ficifolia* Using Citokinin – Induced Basal Trunk Shoots. *International Plant Propagator's Society Proceedings*, v.29, p.118-124.

Nanda, K. K.; Jain, M. K.; Malhotra, S., 1971. Effects of Glucose and Auxins in Rooting Etiolated Stem Segments of *Populus nigra*. *Physiologia Plantarum*, v.24, p.387-391.

Paton, D. M.; Willing, R., R. 1974. Inhibitor Transport and Ontogenetic Age in *Eucalyptus grandis*. In: Plant Growth Substances. Tokyo: Hirokawa. Pp: 126-132.

Pryor, L. D.; Willing, R. R., 1963. The Vegetative Propagation of *Eucalyptus* - An Account of Progress. *Australian Forestry*, v.27, Pp: 52-62.

Vieitez, F. J.; Ballester, A., 1988. Effect of Etiolation and Shading on the Formation of Rooting Inhibitors in Chestnut Trees. *Phyton*, v.48,n.1/2, Pp: 13-19.

Xavier, A.; Comério, J., 1996. Microestaquia: Uma Maximização da Micropropagação de *Eucalyptus*. *Revista Árvore* 20 (1): 9-16.

Zobel, B. J.; Talbert, J., 1984. Applied Forest Tree Improvement. New York: John Wiley and Sons. 505 p.

8. PROPAGACION VEGETATIVA DE *Eucalyptus globulus*

Francisco Soria¹
Gustavo López²

INTRODUCCIÓN

Según la naturaleza reproductiva de la especie, los árboles se han multiplicado principalmente por semillas o por reproducción vegetativa. Como excepción a las semillas pueden mencionarse otras alternativas menos frecuentes para la constitución de nuevas masas forestales, como lo son la regeneración por retoños o rebrotes. Sin embargo, con la contribución de los avances en mejora genética ha crecido el interés por controlar la producción de plantas, primero seleccionando, luego produciendo semillas y finalmente propagando vegetativamente a los individuos superiores.

Los orígenes de la clonación en árboles es muy antigua. Los bosques de *Cryptomeria japonica* son un ejemplo de ello (Ono, 1882, cit. por Zobel, 1993). En el género *Eucalyptus* es un fenómeno más reciente, derivado de la domesticación y cultivo de especies con altas productividades. La multiplicación vegetativa de individuos superiores permite conseguir grandes ganancias en el corto plazo, en comparación con la selección de progenitores y multiplicación seminal de los caracteres fijados. El enraizamiento de estaquillas es importante en el mejoramiento genético porque captura los genes deseables sin necesidad de volver a recombinar y, por consiguiente, sin pérdida de los genes deseados. Cualquier intento de enraizamiento se justifica en la medida que se dispone de buenos genotipos para ser propagados y que compensen dicho esfuerzo.

Eucalyptus globulus no fue una excepción al resto de especies del género *Eucalyptus* con interés productivo. Si bien, fue considerada como una especie complicada para enraizar y ser propagada vegetativamente de forma operativa, la técnica se fue ajustando, las selecciones fueron incorporando la habilidad de enraizamiento y se fueron fijando hasta convertirse en la forma de reproducción exclusiva de varios programas de mejoramiento genético en España y Portugal (Soria, 2003; Rezende, 2009).

Los protocolos de enraizamiento se van nutriendo continuamente de interacciones con procedimientos en otras partes del mundo y a veces utilizados en otras especies de *Eucalyptus*. En la mayoría de los casos, los protocolos no pueden ser reproducidos con el mismo éxito en diferentes ambientes y con diferentes materiales genéticos. Por lo tanto, es difícil indicar un protocolo común para la especie.

ANTECEDENTES DE PROPAGACIÓN VEGETATIVA EN EUCALIPTOS

Las especies tropicales de *Eucalyptus* permitieron desarrollar y ajustar las técnicas de propagación vegetativa por estacas a escala operativa. Las primeras experiencias se desarrollaron en los años 50 en Marruecos (Franclet, 1956), pero no fue hasta final de los años 70 que en el Congo (Chaperon, 1984) y Brasil (Campinhos e Ikemori, 1983) adaptaron las técnicas de propagación a escala operativa.

¹ Ingeniero de Montes. pacosoriapastor@gmail.com

² Ph. D. gustavo.lopez@gmx.co.uk

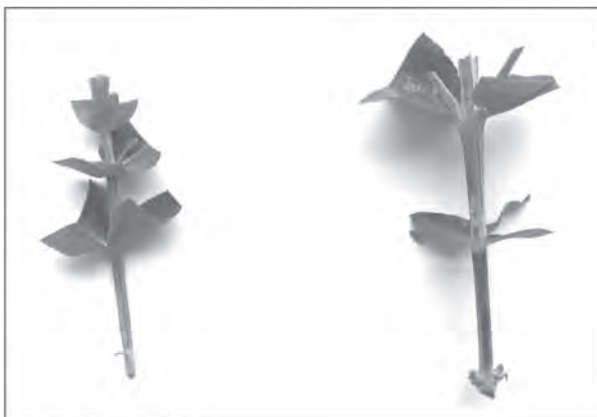
En los comienzos, la estrategia de enraizamiento de estaquillas contemplaba la selección, en plantaciones existentes, de los individuos mejor adaptados a la zona que era objetivo de plantación.

La metodología de propagación vegetativa a escala operativa produjo ciertas repercusiones en las estrategias de mejora. Ello implicó ventajas productivas tanto en cantidad como en los plazos de entrega de la ganancia producida por un programa de mejora.

PROPAGACIÓN VEGETATIVA DE *Eucalyptus globulus*

La mejor especie para la industria celulósica es *Eucalyptus globulus* (Eldridge *et al.*, 1993). Durante muchos años se la consideró una especie relativamente difícil para enraizar (Borralho y Wilson, 1994). *E. globulus* comenzó a multiplicarse vegetativamente por enraizamiento de estaquillas, siguiendo el éxito previamente obtenido con las especies de *Eucalyptus* tropicales comentadas en el apartado anterior. Empresas portuguesas y españolas fueron adoptando la metodología de enraizamiento de macro estaquillas a mediados de los años 80 (Wilson, 1993; Cañas *et al.*, 1994). Mientras, en otras partes del mundo también se ajustaba la técnica, llegando a alcanzar carácter operativo en Chile, Uruguay y parcialmente en Australia. En la actualidad se estima que la superficie plantada con variedades clonales de *E. globulus* corresponden a fracciones menores a la mitad del patrimonio que gestionan las empresas dedicadas a la producción de celulosa (Griffin, 2011).

El material vegetal de reproducción utilizado inicialmente para enraizar se conoce como macro estacas y se lo distingue de las mini estacas que aparecieron posteriormente (Assis, 2001). Las macro estacas se obtienen de ramas jóvenes de aproximadamente 50 -60 cm largo. Se cortan secciones de 8-10 cm a lo largo de la rama descartando los primeros 5-10 cm de la base y los últimos 5-10 cm del ápice (Figura N° 1, derecha). Las mini estaquillas se diferencian de las macro por ser tejidos mucho más nuevos, de no más de 2 semanas y que comprenden el largo completo de la rama joven incluido el ápice (Figura N° 1, izquierda). Dichas diferencias morfológicas se obtienen en procesos de producción diferentes, según se verá en apartados posteriores, conllevan técnicas de enraizamiento diferenciadas y muestran ciertas variaciones en las plantas producidas.



(Fuente: López *et al.*, 2010).

Figura N° 1
MATERIAL DE PROPAGACIÓN DE MINI ESTAQUILLA (Izq.)
Y DE MACRO ESTAQUILLA (Der.)

Existen otras técnicas de propagación vegetativa, tales como el injerto, la reproducción *in vitro* por organogénesis y la producción por embriogénesis somática. Todas ellas han demostrado cierto grado de éxito cuando se les utilizó en *E. globulus* (López *et al.*, 2010) a nivel experimental, piloto o en ocasiones puntuales. Sin embargo, este capítulo se refiere en exclusividad a la producción de plantas por enraizamiento de estaquillas, por ser la técnica utilizada operativamente para reproducción a gran escala.

CONTROL GENETICO DEL ENRAIZAMIENTO DE *Eucalyptus globulus*

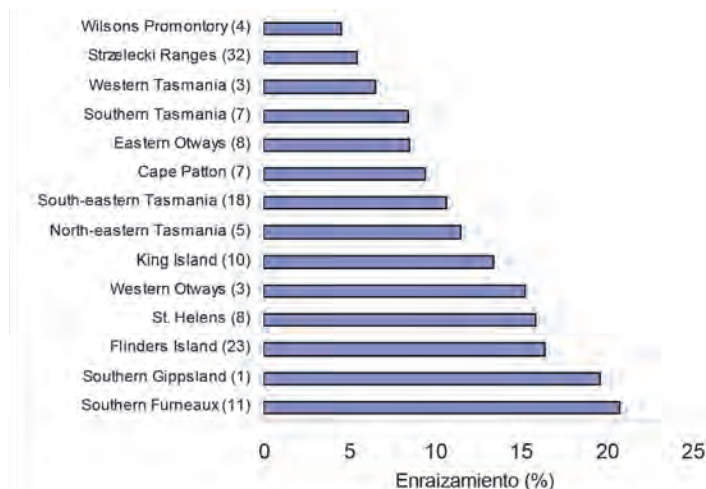
En *E. globulus* la proporción de individuos con elevada capacidad de enraizamiento es muy baja (Cañas *et al.*, 1994; England, 2007) en comparación a otras especies de *Eucalyptus* tropicales. Esta característica puede ser una condicionante que restringe a la población de mejora en características de índices ecológicas o productivas ponderadas con mayor importancia.

Aunque existen numerosos y completos estudios sobre la variación genética y el control genético de varias características de interés, la habilidad de enraizamiento ha sido menos estudiada. Borralho y Wilson (1994); England y Borralho (1995) y Lemos *et al.* (1997) estimaron heredabilidades sobre muestras reducidas. El estudio más completo (Cañas *et al.*, 2004) evaluó todo el rango de variación geográfica de la especie con muestras representativas de todas las subrazas, según la clasificación sugerida por Lopez *et al.* (2001).

En el último estudio mencionado se analizó una gran cantidad de mini estaquillas provenientes de 1.400 clones, pertenecientes a 140 familias de 14 subrazas, las que fueron producidas a partir de plantas de 40 días en invernadero, en las que se realizó hasta 20 cosechas a lo largo de un periodo de 7 meses. Como resultado se observó una variación altamente significativa entre las subrazas. Destacan por su mayor habilidad para enraizar las que conforman el grupo de Islas Furneaux. En contraste las subrazas de menor capacidad de enraizamiento fueron las provenientes del Este de Victoria, como Strzelecki Ranges y Wilsons Promontory (Figura N° 2). Las subrazas de Victoria, que normalmente exhiben los mejores crecimientos en diversos ambientes a lo largo del mundo (Costa e Silva *et al.*, 2005), lamentablemente se encuentran por debajo de la media de enraizamiento de la especie.

Dentro de las 10 mejores familias se encuentran mayoritariamente las de las Islas Furneaux, pero también aparecen otras pertenecientes a subrazas de bajo enraizamiento, por ejemplo Strzelecki Ranges. Estos resultados permiten evidenciar que familias con alto valor genético para enraizamiento se pueden encontrar independientemente de su clasificación racial u origen.

El control genético reportado por Cañas *et al.* (2004) fue moderado ($h^2=0,23$) para pensar en la efectividad de mejorar este rasgo independiente, ya que implicaría una restricción genética muy marcada para rasgos de adaptación y crecimiento. Sin embargo, la alta variabilidad estimada del rasgo dentro de las subrazas permite seleccionar buenas familias, incluso individuos, independiente de la procedencia.



(Número entre paréntesis indica la cantidad de familias que representan a cada grupo genético)

Figura N° 2
PORCENTAJE DE ENRAIZAMIENTO DE CADA SUBRAZA DE *Eucalyptus globulus*.

PROCESO DE PRODUCCION DE PLANTAS CLONALES DE *Eucalyptus globulus* POR ENRAIZAMIENTO DE ESTAQUILLAS

La producción clonal de plantas mediante estaquillado es un proceso complejo, que incluye varias etapas. Cada una está condicionada a la interacción de variables ambientales y de manejos diversos según las referencias (Majada *et al.*, 2012).

A continuación se describe el proceso desarrollado en ENCE durante los últimos 30 años, el que ha permitido en la actualidad disponer de una producción estable superior a los 4 millones de plantas anuales en sus instalaciones de Huelva en el sur oeste de España.

La secuencia de los subprocesos se desarrollará en el orden que se presenta en el esquema de la Figura N° 3.



Figura N° 3
ETAPAS DEL PROCESO DE ESTAQUILLADO DESARROLADO POR ENCE EN HUELVA, ESPAÑA

Cultivo de Pies Madre y Producción de Material de Propagación

Los pies madres son las plantas que se cultivan intensivamente para que produzcan los propágulos que se utilizarán para enraizar. La tendencia general en el manejo de los pies madres de *E. globulus* ha sido ir desde un cultivo más extensivo hacia uno más intensivo. Los primeros parques comenzaron estableciéndose en el suelo, así como también en contenedores o macetones con volúmenes de 5 a 10 litros por planta. Progresivamente y gracias a los avances en otras especies de eucalipto se ha ido imponiendo el sistema de miniestaquillado, con pies madres de menor tamaño y mucho mayor control de las condiciones ambientales.

Actualmente se mantienen los dos sistemas de producción, macro estaquillado y mini estaquillado.

- Macro Estaquillado

Para la producción de macro estaquillas, los pies madre se instalan en un suelo artificial en las instalaciones del vivero. Este se compone de un aporte de suelo vegetal arenoso enriquecido con materia orgánica de diversas procedencias. Hay que tener en cuenta que *E. globulus* es especialmente sensible a la falta de aireación en el suelo, ya sea por compactación o textura muy arcillosa. Se ha probado colocar malla plástica cubriendo el suelo para evitar la competencia de las malas hierbas, pero ha dado mejor resultado la cobertura con corteza de pino. Además, se ha logrado una disminución del consumo de agua al reducir la evaporación.

Los pies madre se plantan al tresbolillo con una separación entre plantas de 30 cm (11 plantas/m²). Se pueden proteger los pies madre con malla de sombreo disminuyendo la insolación directa, muy elevada en las condiciones del clima mediterráneo genuino de Huelva. En caso de fuertes vientos y/o heladas es necesario proteger adecuadamente a las plantas de estos riesgos mediante cortinas corta vientos, cubiertas artificiales o sistemas de riego anti-heladas.

Como otros tantos aspectos el sistema de riego utilizado debe adecuarse a las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra el vivero. Bajo clima mediterráneo, desde mediados de primavera hasta bien entrado el otoño, época en la que se concentra la producción de esquejes, el tiempo es muy estable y seco. Esto hace que las plantas crezcan casi totalmente libres de problemas fitosanitarios. En estas condiciones, el riego por micro aspersores no presenta mayores inconvenientes.

En climas más húmedos, para proteger las plantas de enfermedades fúngicas y bacterianas es más aconsejable utilizar otros sistemas de riego, como el riego por goteo, evitando mantener las hojas humedecidas mucho tiempo. Es importante para esta especie no regar en exceso para mantener un buen nivel de aireación en el sustrato. Se debe, por tanto, controlar el nivel de humedad en el sustrato mediante cualquier tipo de dispositivo (sondas de humedad, tensiómetros, otros) para mantenerlo lo más cercano posible a la capacidad de campo.



Figura N° 4
PIES MADRE DE MACRO ESTAQUILLAS DE *E. globulus*

El factor de mayor importancia en el manejo de los pies madre es sin lugar a dudas la nutrición de los mismos. El mejor sistema para mantener unos adecuados niveles nutricionales es la fertirrigación, incorporando los nutrientes en el sistema de riego y aportando los mismos cada vez que se riega. El aporte regular y en pequeña concentración de los nutrientes en la solución fertilizante es la manera de optimizar su asimilación por la planta. Se debe controlar el correcto funcionamiento de los inyectores de la solución madre en el sistema de riego y que llegue la concentración de sales correcta a los emisores, evaluando la conductividad en los mismos.

A la hora de formular la solución fertilizante es muy importante considerar los aportes de sales que vienen en el agua de riego. Por ejemplo, en Huelva no es necesario incorporar calcio, magnesio, azufre y zinc al sistema, debido al elevado contenido de estos elementos en el agua utilizada. Los equilibrios nutricionales pueden variar a lo largo de la estación de producción. Sin embargo, para estimular el crecimiento es importante mantener una fuente nitrogenada generosa. En época de máxima producción, la solución fertilizante contiene una concentración de 150 ppm de N, 42 ppm de P y 35 ppm de K. Esto se complementa, si es necesario, con correcciones de micronutrientes. El Boro y el Hierro son aportados frecuentemente.

En el Cuadro N° 1 se presenta los intervalos de niveles de concentración foliar en que deben mantenerse los principales macro y micro nutrientes de acuerdo a la experiencia acumulada en ENCE. Es necesario realizar análisis foliares periódicos para controlar dichos niveles.

El control de la solución del suelo a nivel del sistema radical y por debajo del mismo permite optimizar aún más el aporte de agua y nutrientes. Si bien *E. globulus* no es especialmente sensible a la salinidad, se debe controlar esta en el suelo (evaluando la conductividad) para no tener pérdidas de productividad. Es importante conocer la influencia de los cambios estacionales en la actividad de los pies madre causados por las variaciones en las temperaturas y el fotoperíodo, para regular los aportes de nutrientes.

Cuadro N° 1
NIVELES NUTRICIONALES DE REFERENCIA EN LOS PIES MADRE DE *E. globulus*

Nutriente	N (%)	P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (mg/kg)	B (mg/kg)
Intervalo de concentración foliar	2,6	0,15	1	>0,65	0,15	60	20
	3,5	0,38	1,5		0,41	120	35

Durante los seis meses de producción se obtienen 20 estaquillas por pie madre al mes como media de los diferentes clones en producción. Se ha evaluado durante más de 8 años la productividad de los pies madre y la calidad de las estaquillas producidas por estos. No se ha observado empeoramiento con el tiempo de ninguna de las variables observadas. Parece que el manejo dado y la continua poda de los pies madre los mantiene en un adecuado nivel de juvenilidad que no disminuye con el paso del tiempo.

- **Mini Estaquillado**

Para la producción de miniestaquillas los pies madres se cultivan en invernadero o en umbráculo con protección de malla de sombreo. Se pueden utilizar sistemas hidropónicos en sustratos inorgánicos (perlita, vermiculita, arena fina, polyespan) u orgánicos (turba, fibra de coco, otros), o mixtos. En Huelva se han obtenido muy buenos resultados con fibra de coco de grano fino que es lo que se utiliza en la actualidad. La decisión debe tomarse teniendo en cuenta la disponibilidad de los diversos sustratos, las condiciones climáticas y el sistema de riego elegido.

Son muchísimos los soportes que se pueden utilizar para los pies madre, desde canaletas de diversos materiales, pasando por cajas o cajones de diversas formas y tamaños, hasta bolsas de plástico cilíndricas o los mismos tubetes usados para las estaquillas. En cualquier caso hay que asegurarse de un adecuado drenaje y de que haya suficiente sustrato para mantener un sistema radical que permita una producción óptima de los pies madre. En ENCE se utilizan cajas de plástico de 50 x 37 cm en el exterior y cajoneras de acero inoxidable en los invernaderos. La profundidad de las mismas es superior a los 20 cm, plantándose los pies madre separados 20 cm unos de otros. La mayor parte del sistema radical se concentra en los primeros 15 cm de sustrato.

La producción más intensiva de las mini estaquillas permite un mayor control de las condiciones ambientales. La temperatura óptima de desarrollo está sobre los 12 °C y hasta los 30 °C. Sin embargo, no significa que no crezca fuera de ese rango óptimo. Las temperaturas altas ayudan a secar las hojas para evitar que se depositen acumulaciones de agua en superficie. Con temperaturas inferiores se conseguirá un crecimiento más lento, lo que se traducirá en una rotación de cosecha mas espaciada del material de reproducción.

Cuando los pies madres se cultivan en invernaderos, se consigue mantener la temperatura dentro de los márgenes óptimos con un sistema de enfriado de aire (*cooling system*) que se activa con un termostato que mantiene la temperatura por debajo de los 30 °C. Mientras que en invierno, cuando la temperatura baja de los 12 °C, el termostato activa una caldera que hace circular agua a temperatura de 20-25 °C por cañerías de PVC ubicadas debajo de las raíces de los pies madres, lo que mantiene la temperatura ambiente por encima de los 12 °C.

Mantener la humedad del aire por debajo del 70% permite que no proliferen enfermedades y que las plantas respiren/transpiren y crezcan. Cuando los pies madres se cultivan al exterior la humedad no es controlable. Sin embargo, en invernaderos la humedad se puede controlar con los riegos y un sistema de ventilación forzada. Los túneles de producción tienen ventanas laterales y ventanas cenitales que al abrirse de forma conjunta producen un movimiento de las masas de aire en efecto chimenea, renovando el aire que de otra forma puede confinarse y cargarse de humedad en un ambiente cerrado.

Respecto al riego, son válidas las mismas consideraciones hechas para los pies madre de macroestaquillas. Sin embargo, en sistemas hidropónicos se abre el abanico de posibilidades en los sistemas de riego a utilizar. En Uruguay, Mundial Forestación utiliza con éxito un sistema de riego por subirrigación. En Portugal se usa riego por goteo o microaspersores. La aplicación de riego por aspersión sobre las hojas en los pies madres, en climas húmedos y cálidos, puede favorecer el desarrollo de enfermedades fúngicas principalmente en las hojas. La humedad en el sustrato debe controlarse periódicamente para mantenerla en niveles de capacidad de campo, para maximizar la producción, pero teniendo especial cuidado de no provocar encharcamiento.

Para conseguir un desarrollo abundante de material vegetal, es necesario acompañar el crecimiento con una fertilización que lo facilite. Como en el caso de los pies madre de macro estaquillas, la fertirrigación es el sistema ideal de aporte de nutrientes. Todo lo relatado para las macro estacas es aplicable aquí. Las soluciones fertilizantes usadas son similares en ambos casos. En sistemas hidropónicos, es muy importante controlar la salinidad en el sustrato, analizando la conductividad en el caudal de riego, en la solución del suelo a nivel de las raíces y por debajo de las mismas en la solución de drenaje. El análisis de estas soluciones permite además ajustar la fertilización estacionalmente, de acuerdo al consumo real de las plantas.



Figura N° 5
PIES MADRE DE MINI ESTAQUILLAS DE *E. globulus*

Al tratarse de un sistema de producción más intensivo que el del macro estaquillado, es más fácil la protección de la planta contra agentes abióticos y bióticos. El cultivo bajo cubierta evita o disminuye los daños por heladas, fuertes vientos y aguaceros y elevadas temperaturas. Cuando se dan condiciones adecuadas para el desarrollo de enfermedades fúngicas, como es el caso de *Botrytis cinerea* (temperaturas suaves, humedad relativa muy alta, baja luminosidad y material vegetal tierno) es conveniente la aplicación de fungicidas preventivos. Es conveniente

la eliminación por corte a la salida del invierno, de los brotes muy lignificados y con deficientes niveles nutricionales o dañados por el frío.

De igual manera, es conveniente la poda del brote apical de la planta cuando se implanta el pie madre, para facilitar la pronta ramificación del mismo abriendo la pequeña copa. Las tijeras utilizadas para el corte de los pies madre deben ser diariamente desinfectadas para evitar la transmisión de los agentes patógenos

Durante los aproximadamente 6 meses de periodo productivo, se producen una media de 10 estaquillas por mini pie madre al mes en Huelva.

Cosecha y Preparación de Estaquillas

Tanto para las macro como mini estaquillas, es conveniente cortar los brotes de los pies madre muy turgentes, con alto potencial hídrico para disminuir los efectos perniciosos de la deshidratación en las siguientes fases del proceso. Con altas temperaturas y baja humedad relativa, es ideal cortar los brotes necesarios para la producción diaria, en las primeras horas de la mañana y conservar los mismos, en condiciones que limiten las pérdidas de humedad (cuartos oscuros y refrigerados). De esta manera las hojas cierran estomas tras el corte y se mantiene el potencial hídrico de las hojas en sus niveles más altos.

En condiciones de verano mediterráneo (temperaturas máximas superiores a 40 °C y humedades relativas muy bajas) las estaquillas se mantienen en buen estado sin disminuir su tasa de enraizamiento durante más de 48 horas.

Se debe evitar cortar las ramillas de los pies madre, cuando las hojas se encuentran lavadas de la cubierta de ceras que recubren las hojas de *E. globulus*. Esto se produce cuando los parques de pies madre se encuentran a la intemperie y luego de fuertes aguaceros. La cera es un protector natural contra la deshidratación y su carácter hidrófobo permite a las hojas de los esquejes mantenerse humedecidas y al mismo tiempo realizar un adecuado intercambio gaseoso con la atmósfera circundante. El tamaño medio de las ramillas procedentes de los macro pies madre es de 40 cm y el de las procedentes de los mini pies madre se procura que no supere los 20 cm. Ramillas de mayor tamaño se lignifican en exceso, mientras que las más pequeñas presentan una alta proporción de material succulento.

A los tejidos endurecidos les cuesta más emitir raíces, en tanto que los succulentos se deshidratan con mucha facilidad. Normalmente las ramillas se cortan dejando un par de hojas por debajo del corte para facilitar el rebrote. Se cortan solo las ramillas que presentan el tamaño y consistencia adecuados, dejando las más finas para que sigan su normal desarrollo. Solo si se observa un exceso de brotes en el pie madre se puede descargar este, para que las ramillas tengan una adecuada iluminación. La periodicidad del corte en los pies madre oscila entre 4 y 8 días durante las estaciones de primavera y verano, cuando se concentra la producción.

El transporte de las ramillas a la zona de conservación se realiza en cajas cerradas de poliestireno expandido y en estas mismas se mantienen hasta su preparación. La zona de trabajo, donde se preparan los esquejes debe estar protegida de las inclemencias del tiempo atmosférico. En verano un sistema de refrigeración por niebla funciona en la zona de trabajo, creando un ambiente más fresco para las plantas y los operarios.

Las macro estacas se preparan cortando las ramillas, seccionado el ápice para evitar su deshidratación y consecuente contaminación (generalmente *Botrytis cinerea*), y con dos pares de hojas. Además, las hojas son seccionadas en su mitad para disminuir las pérdidas de humedad por transpiración y el contacto con las hojas de los otros esquejes. Se realizaron diversos ensayos para evaluar el número de hojas en las estaquillas y la superficie permanente de estas. El mejor resultado se obtuvo con las estacas preparadas como se han descrito anteriormente.

Las mini estacas, como para otras especies de eucalipto, se preparan de forma similar a las macro pero no se secciona el ápice. Se ha probado con éxito preparar una segunda estaquilla de la ramilla cuando esta es suficientemente grande. La estaca basal es similar a las macro estaquillas y su porcentaje de enraizamiento no suele ser significativamente distinto al de las primeras mini estaquillas.

Durante la manipulación de las estacas, se debe procurar rozar lo menos posible la superficie de las hojas para evitar eliminar la cubierta protectora de ceras.

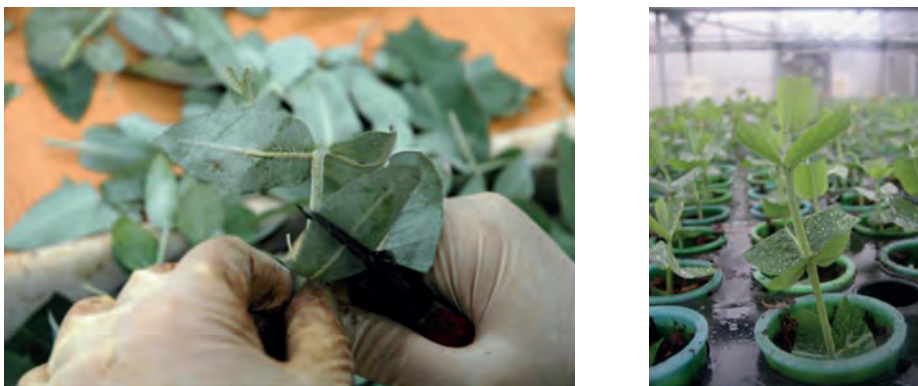


Figura N° 6
PREPARACIÓN DE MACROESTAQUILLA Y PRIMER PLANO DE MINIASTAQUILLA

No se utilizan hormonas vegetales (reguladores del crecimiento) para mejorar el enraizamiento de los esquejes. En pruebas con dosis creciente de Ácido Indol Butírico (IBA) no se logró una mejora en la tasa de enraizamiento en ninguno de los clones en producción. Se ensayaron concentraciones de IBA aplicado con talco de 1.500 ppm hasta 9.000 ppm. Con dosis por encima de 3.000 ppm se retrasaba considerablemente la brotación de las estaquillas.

Estaquillado

- Sustrato

La elección de un adecuado sustrato de enraizamiento es un factor fundamental en la optimización del proceso. El sustrato es el medio de cultivo en el que se desarrollaran las raíces de la planta y debe cumplir con la misión de soporte físico de las raíces, facilitar el agua y nutrientes a las mismas y permitir además una buena aireación al sistema radicular. El que el sustrato mantenga estas condiciones idóneas de enraizamiento no solo depende de sus características intrínsecas (textura, estructura porosidad, otras) sino también de cómo interacciona este con las otras condiciones ambientales, como la temperatura la humedad del aire, la dosis y frecuencias de los riegos y hasta el envase utilizado. Por esta razón, es difícil encontrar una solución universal

para todos los proyectos. Según las condiciones ambientales de cada lugar se debe seleccionar el sustrato más adecuado.

En cualquier caso, el sustrato debe tener un pH ligeramente ácido para favorecer la asimilación de nutrientes, tener una porosidad bastante alta para que a pesar de los riegos frecuentes mantenga un alto nivel de aireación, tener un buen nivel de agua fácilmente disponible por la planta para que esta no se deshidrate en las primeras fases de enraizamiento y ser estable para que sus propiedades no se deterioren a lo largo del periodo de cultivo. También es interesante para su manejo que sea fácil su rehidratación

A lo largo de 30 años, son numerosos los sustratos ensayados de acuerdo a las disponibilidades en el mercado. Se han utilizado sustratos orgánicos (turbas rubias y negras, corteza de pino compostada, corcho, fibra de coco, otros), inorgánicos (arena fina, perlita, vermiculita y poliestireno expandido, entre otros.) y mezclas de los mismos en diversas proporciones. Tanto en España como en Uruguay se utilizó durante bastantes años sustratos a base de corteza de pino compostada, pues fueron los que ofrecieron mejores resultados. La corteza de pino ofrecía muy buena porosidad, facilitando la aireación del sustrato y permitiendo un buen estado fitosanitario de las estaquillas. Como principales inconvenientes, presentaba la irregularidad de las partidas en cuanto al tamaño del grano y sobre todo del grado de compostación y deficiente sujeción de la estaca en el sustrato. La generalización del uso de la fibra de coco en los cultivos hortícolas, así como su precio y disponibilidad, permitió su inclusión en las mezclas de sustratos de enraizamiento. En los ensayos realizados, la fibra de coco mostró su superioridad en casi todas las características evaluadas; tasa de enraizamiento y supervivencia, crecimientos en altura y diámetro, consistencia del cepellón, número de raíces principales y densidad global de raíces. Sin duda, la característica más interesante de la fibra de coco es la elevada porosidad (>90% V/V) que permite una gran aireación y desarrollo saludable de las raíces. Actualmente se utiliza un sustrato mezcla de fibra de coco fino al 70% con turba rubia al 30%. Este componente se utiliza para incrementar la disponibilidad de agua fácilmente utilizable por la planta, parámetro bastante bajo en la fibra de coco.

A la mezcla de sustratos se le adiciona fertilizante granulado de liberación controlada, pues el sustrato normalmente tiene un nivel muy bajo de contenido nutritivo. La cubierta de resina que recubre los agregados en este tipo de fertilizante, condiciona su liberación a la temperatura y la independiza de la humedad, evitando su lixiviación por exceso de riego. Para las fases iniciales del cultivo es importante que el sustrato aporte un contenido mínimo en los nutrientes esenciales. Se utilizan concentraciones bajas (0,9 g/ L de un equilibrio 16-8-12) para poder controlar el crecimiento de la planta. Debe tenerse en cuenta que en climas mediterráneos la época de plantación se reduce a los periodos de octubre a diciembre y de febrero a marzo, lo que obliga a tener la planta en el vivero durante bastantes meses y por tanto a controlar su crecimiento. El periodo de liberación teórico del abono de liberación controlada es de 6 meses, si bien esto depende de la temperatura. Por ejemplo, en las condiciones estivales del sur de España, este se reduce a 3 ó 4 meses. La fertilización se complementa con fertirrigación de acuerdo a las necesidades de la planta y el ritmo de crecimiento deseado.

- **Contenedores y Soportes**

Debido a la necesidad de manipulación y de clasificación de las plantas, por pérdidas en la fase de enraizamiento, se tiende a utilizar envases individuales soportados en bandejas de diferentes formas y composiciones. El contenedor que se utiliza en ENCE es un tubo o

tubete derivado del registrado Superleach®. Tienen una boca circular de 3 cm de diámetro y se desarrolla con una forma tronco-cónica hasta los 21 cm de profundidad. El tubete Superleach había sido diseñado para coníferas que tienen la necesidad de desarrollar una raíz pivotante larga. Para la producción de plantas de *E. globulus* se ha acortado su profundidad a 16 cm y consecuentemente reducido el volumen contenido a solo 90 cm³.

La dimensión del contenedor influye sobre la formación de raíces y el cepellón. El cepellón es la porción de la planta formada por el sustrato y las raíces que lo fijan y está moldeada por la forma del envase en que se ha cultivado. La formación firme del cepellón esta dada por la cohesión raíces-sustrato. Sin embargo, se ha comprobado que para el caso de *E. globulus*, el acortar el tiempo para favorecer la poda de la raíz apical permite una rápida estimulación de raíces adventicias. Ello repercute en menor tiempo de desarrollo en vivero, mejor cohesión del cepellón y menos exposición a daños durante la plantación, además de reducir el consumo de sustrato.

El contenedor tiene en la pared interior unas nervaduras verticales para interrumpir el direccionamiento espiralado de las raíces y reconducirlas a un desarrollo vertical. Las raíces espiraladas no ocasionan problemas en vivero pero luego de un par de años en el campo las raíces se estrangulan produciendo susceptibilidad a enfermedades de raíz y/o vuelcos de plantas de 4 a 6 metros de altura. El material utilizado para confeccionar los contenedores es plástico reciclado. Los contenedores se reutilizan varias veces luego de la campaña de producción. Los orificios del final del contenedor permiten el libre drenaje de los excesos de agua y además al exponer las raíces al aire permiten un repicado natural de las raíces y la estimulación del crecimiento de nuevas raíces adventicias.

La distancia entre contenedores viene dada por las dimensiones de las bandejas que los contienen, afectando la densidad de plantas. La densidad, medida como el número de plantas por metro cuadrado de superficie, viene dado por la dimensión del tubete y la geometría de la bandeja que contiene a los tubetes. En el caso de ENCE es de 365 plantas por metro cuadrado. Una densidad excesiva produce tallos finos, débiles (plantas ahiladas) para enfrentar las condiciones de campo. Menor densidad, induciría la producción de plantas más gruesas y resistentes, pero implica el uso de mayor área en el vivero.

Las bandejas además de estar diseñadas para soportar los contenedores en forma vertical y a una distancia separada del suelo, tienen una estructura pensada para desplazarse sobre superficies planas y permitir la mecanización de desplazamientos y llenado de los contenedores de forma mecanizada.

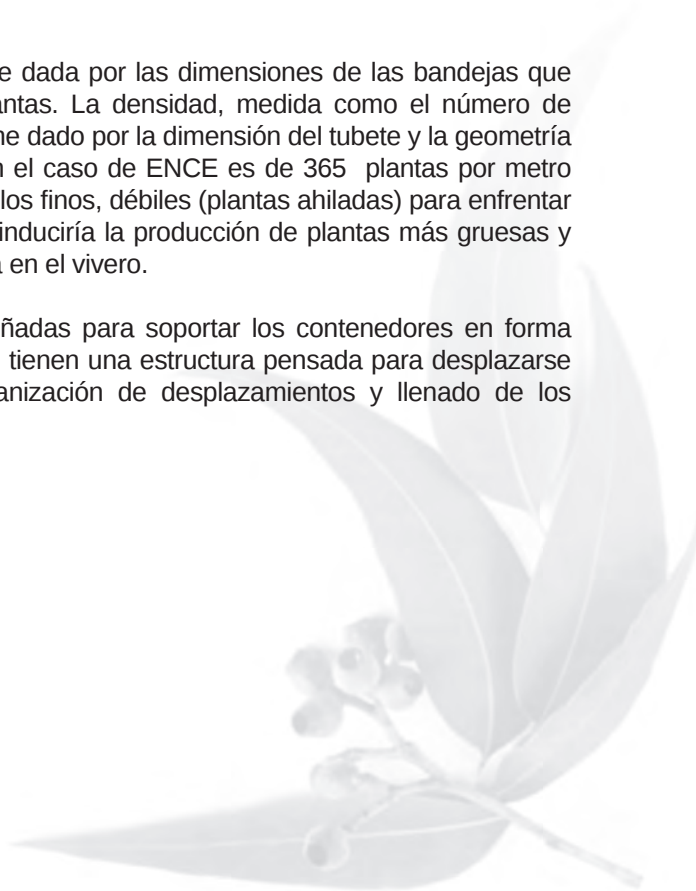




Figura N° 7
BANDEJAS CON TUBETES PARA ESTAQUILLAS DE *E. globulus* EN VIVEROS DE ENCE

- **Llenado de Envases y Plantación de Estaquillas**

La preparación de los envases hasta que se realiza la plantación de los esquejes se realiza mediante una máquina que se alimenta con las bandejas apiladas. La máquina desapila las bandejas, las coloca horizontalmente sobre una cinta transportadora y rellena los tubetes con sustrato. Este ha sido introducido en una tolva de alimentación mediante *big bag*. De aquí pasa a un depósito donde se mezcla con el fertilizante y posteriormente se deja caer sobre las bandejas. Mediante una placa con punzones el sustrato se compacta en los tubetes y un cepillo giratorio limpia y enrasa el sustrato en las bandejas. Un riego por cortina de aspersores termina por preparar las bandejas para la implantación de las estaquillas. La máquina tiene dos líneas separadas para macro y mini estaquillas.



Figura N° 8
MAQUINA DESAPILADORA DE BANDEJAS Y LLENADORA DE TUBETES
EN VIVEROS DE ENCE EN HUELVA

Las estaquillas se plantan con la precaución de manipular lo menos posible las hojas y evitando colocarlas demasiado próximas al borde del tubete. También se debe procurar no introducirlas a demasiada profundidad, de forma que las hojas inferiores toquen el sustrato y se doblen hacia el tallo. Esto hace que el agua se quede acumulada en esta zona pudiendo inducir el desarrollo de hongos.

Una vez implantadas, las estaquillas son rociadas con un riego por nebulización y pasan al sistema de mesas móviles del vivero. Estas son transportadas al área de enraizamiento. La mecanización permite una ergonomía óptima para las operarias que no requieren levantar el peso de las bandejas para transportarlas.



Figura N° 9
IMPLANTACIÓN DE MACRO ESTAQUILLAS DE *E. globulus*

Enraizamiento

Durante las estaciones de primavera y verano se obtiene las mejores tasas de enraizamiento, manteniendo las estaquillas bajo una malla de sombreo, que si quedasen en el interior de invernaderos cubiertos de material plástico rígido y control de temperatura mediante *Cooling System*. La mejor ventilación en el exterior permite mantener un estado fitosanitario muy bueno en esta fase, prácticamente sin pérdidas por infecciones criptogámicas. Actualmente se realiza esta fase en un umbráculo, de malla blanca del 50% de sombreo. La instalación tiene dos sistemas de riego, uno de nebulizadores plásticos bastante próximos a las bandejas y otro sistema de micro-aspersores más elevado.



Figura N° 10
UMBRÁCULO DE ENRAIZAMIENTO CON DOBLE SISTEMA DE RIEGO

El caudal de los nebulizadores es de 40 L/h y permite, mediante breves riegos periódicos, mantener la turgencia de las estaquillas, refrescando las hojas y limitando la transpiración de las mismas. Durante las tres primeras semanas se mantienen los esquejes solo con este riego intermitente, aplicando riegos de un minuto de duración cada 20 a 30 minutos.

El comienzo y fin de los riegos se adapta a los cambios en el fotoperíodo y la temperatura. Estos parámetros están adaptados a las condiciones climáticas del sur de España y al sistema de producción (riego, envases, sustrato) utilizado en ENCE, y no tienen porqué ser directamente extrapolables a otras condiciones y latitudes. Lo fundamental es que las estaquillas permanezcan en buen estado vegetativo permitiendo la emisión de las raíces adventicias.

En esta fase las macro-estacas presentan un ligero mejor comportamiento que las mini-estacas cuando las temperaturas y el déficit de vapor de la atmósfera son elevados. Las macro son más robustas y soportan mejor la deshidratación. Sin embargo, en condiciones más frescas, como a mediados de otoño o principios de primavera, se comportan ligeramente mejor las mini-estacas, siendo más rápidas en la emisión de raíces.

Aclimatación

A partir de la tercera semana y dependiendo de las condiciones climáticas y del clon de que se trate, comienzan a aparecer las primeras raíces. En ese momento se empieza a practicar un cambio de riego paulatino, disminuyendo la frecuencia de la nebulización y aportando riego por microaspersión.

En esta etapa empieza también a desarrollarse la nueva parte aérea de las plantas. Finalmente, se elimina el riego por nebulización y sólo se utilizan los micro-aspersores. Con ello se pretende lograr un efecto similar al de una lluvia que moje todo el contenido del tubete.

Con este procedimiento se evita que las raíces se desarrollen orientándose a la zona húmeda superficial del contenedor y se estimula que la raíz profundice en busca de humedad. Al distanciarse los riegos, se permite que las hojas se sequen, se incremente la transpiración y se estimule el intercambio gaseoso y el crecimiento de la planta.

Este período de aclimatación tiene una duración de entre 2 y 5 semanas dependiendo de la estación.

Desarrollo

Una vez concluida la fase de aclimatación, se observa un desarrollo importante de la parte aérea de las plantas y las raíces adventicias asoman por la parte inferior de los envases. En este momento las plantas se sacan al exterior, sin ningún tipo de cubierta protectora y se procede a la eliminación de las estaquillas muertas y a la clasificación por tamaños de las vivas.

Con esto último se trata de evitar que las plantas de menor desarrollo queden dominadas por las más vigorosas, faltándoles el agua y la luz necesarias para su normal crecimiento.

El porcentaje medio de éxito en esta fase es actualmente del 86%, tanto para macro como mini estaquillas, variando para cada uno de los 6 clones que componen la actual población de propagación, entre el 72 y el 93%.

Estos resultados tan interesantes permiten producir una planta mejorada de *E. globulus* a costos comerciales competitivos.



Figura N° 11
PLANTA DE *E. globulus* PRODUCIDA MEDIANTE ESTAQUILLADO
EN VIVERO DE ENCE (HUELVA, ESPAÑA)

Comienza aquí una fase de crecimiento vigoroso de las plantas clonales, que se regula en función de la planificación de plantación. Las plantas clasificadas de menor tamaño son ayudadas mediante fertilizaciones localizadas para homogeneizar los lotes. Por otro lado la fertirrigación permite regular el crecimiento anteriormente mencionado.

Se utilizan fertilizantes líquidos preparados de acuerdo al equilibrio requerido y de la misma manera que en el parque de pies madre. Si es necesario tener mucho tiempo la planta en vivero, se debe tener la precaución de mantener un nivel mínimo nutricional de los principales elementos, pues de lo contrario peligra el estado sanitario de las plantas (por ejemplo, las hojas más viejas pueden sufrir ataques de *Mycosphaerella* sp.). Se realiza por ello un control nutricional mediante análisis foliares periódicos.

Si las condiciones climáticas son propicias para el desarrollo de algunos hongos, como *Botrytis cinerea*, se realizan tratamientos preventivos con fungicidas sistémicos, alternándose las materias activas utilizadas para evitar la aparición de cepas resistentes.

Si existe riesgo de heladas, es necesario disponer de un sistema de protección para evitar los daños. Para este efecto, en el vivero de ENCE en Huelva se dispone de un sistema de riego anti-heladas que se pone en marcha cuando la temperatura alcanza los 0°C a la altura de las plantas.

En climas templados y húmedos se prefieren plantas pequeñas, que tan solo supere los 20 cm de altura, mientras que para clima mediterráneo se prefieren plantas más robustas, con altura superior a los 30 cm. Una vez que se ha alcanzado este tamaño y la planta cumpla las prescripciones de calidad exigidas, como correcta formación del cepellón, ausencia de síntomas de carencias nutricionales y de enfermedades, presencia de raíces blancas activas, entonces se puede proceder a preparar las plantas para su embarque y transporte a campo.

Las plantas se clasifican nuevamente por tamaños y se eliminan las plantas secas. El porcentaje de plantas perdidas es tan solo del 5%, lo que implica que el porcentaje medio de éxito definitivo del proceso completo supera el 83%.



Figura N° 12
PLANTAS CLONALES DE *E. globulus* EN FASE DE RUSTIFICACIÓN O ENDURECIMIENTO

El concepto de rustificación o endurecimiento no necesariamente está relacionado con exponer a la planta a un estrés moderado, por falta de nutrientes o agua o exposición a frío. Se trata de conseguir una rustificación de los tejidos fisiológicos, suficiente como para tolerar las condiciones de plantación a campo, superar el estrés post-plantación y continuar creciendo. Parte de esa rustificación viene dada por el desarrollo normal de una planta saludable con nutrición equilibrada, que le permita sintetizar y movilizar reservas cuando las necesite en el momento de plantación definitiva en campo. Se han realizado experiencias para mejorar la tolerancia al frío aumentando la proporción de Potasio hasta 9 veces más que la dosis de crecimiento proporcionando buena resistencia al frío.

VENTAJAS DE LA PROPAGACION VEGETATIVA

El creciente interés por utilizar este método de propagación, se debe a la simpleza y rapidez con que se hacen operativas las ganancias genéticas que ofrecen los programas de mejora. La gran diferencia con la mejora genética y su implementación mediante semillas, es que con el acierto en la selección de genotipos superiores y mediante la multiplicación clonal se consiguen grandes ganancias en plazos reducidos. Esto ha sido claramente demostrado en otras especies de *Eucalyptus* y *E. globulus* no es la excepción. Mientras algunas referencias mencionan las restricciones de propagación vegetativa de esta especie (Griffin, 2011), las extensas superficies clonales implantadas en España, Portugal y Chile muestran otra realidad.

En relación a las plantaciones establecidas con material clonal, a continuación se comentan las características más destacadas.

La homogeneidad de las plantaciones ofrece una impresión visual muy agradable. También se aprecia la bondad de la homogeneidad al momento de la cosecha y de abastecimiento al proceso de transformación de la madera. Sin embargo, esas hipotéticas ventajas pocas veces se ponen en valor económico a favor del productor forestal.

Posiblemente la mayor ventaja que puede percibir el productor este dada por el establecimiento de plantaciones mejor adaptadas a las condiciones del sitio. Ello retribuye con mayor producción y menor costo.

Otra ventaja potencial de las repoblaciones clonales homogéneas, es el impacto que conlleva la minuciosa aplicación de prácticas silvícolas acertadas. Sin lugar a dudas, las

plantaciones clonales permitieron ajustar los programas de fertilización para alcanzar óptimos que anteriormente eran imposibles en masas implantadas con material de procedencia seminal.

En contraposición a las ventajas descritas, se esgrime la reducción de la diversidad genética que se ocasiona con el establecimiento de masas monoclonales. Ciertamente, la reducción en diversidad es marcada y puede llegar a ser una desventaja al momento de afrontar la resistencia a nuevas plagas o epidemias que afecten negativamente el desarrollo o estado de las plantaciones. Las recomendaciones realizadas por Zobel (1993) para plantaciones clonales de *Eucalyptus*, indican que los bloques de plantación no deberían superar las 10 hectáreas y que se debería alternar con diferentes clones en situación de plantaciones en masas continuas de mayor superficie. Igualmente, es posible asumir que la reducción de la diversidad genética esta compensada por una correcta selección de genotipos con superior adaptación ecológica, en contraste a poblaciones variables de origen seminal.

En general, clones mejor adaptados experimentarán una mejor defensa frente a plagas y enfermedades. En última instancia, el productor forestal asume el riesgo de disminuir la diversidad a favor de quedarse con lo más ventajoso.

La aceptación de las plantaciones clonales, estará ligada a la correcta selección de genotipos vigorosos que aumenten la producción y los beneficios de los productores. La sustentabilidad de dichas plantaciones dependerá de la paulatina sustitución del material genético por clones cada vez más vigorosos. Para ello es imprescindible que activos programas de mejora genética sinteticen nuevas generaciones por cruces entre individuos superiores y se evalúen en los sitios objeto de plantaciones futuras.

CONCLUSIONES

La calidad de la planta clonal fue un punto criticado cuando se comenzó a desarrollar la técnica de enraizamiento, pero las mejoras en este proceso, junto con la selección de mejores genotipos, permitieron vencer esos prejuicios que condicionaron en algunas situaciones el desarrollo inicial de este sistema de propagación.

Un manejo no adecuado en vivero puede resultar en la producción de plantas con dificultades morfológicas o fisiológicas, que condicionan su normal enraizamiento, establecimiento en campo y crecimiento inicial.

Una vez superado el estrés post plantación, las plantaciones de *Eucalyptus* suelen recibir una fertilización de inicio, que se aplica de forma simultánea con la plantación y que permite a las plantas aprovechar esos nutrientes para desarrollar raíces, reservas y nuevas hojas que mejoran su capacidad de establecimiento en el sitio. Una adecuada preparación del terreno que permita el rápido desarrollo de las raíces en profundidad es otro factor fundamental para mejorar la estabilidad de las plantas clonales.

A pesar de la dificultad inherente a la especie, de encontrar individuos con alta capacidad de enraizamiento y las peculiaridades de la misma con respecto a otras especies de *Eucalyptus*, se ha puesto de manifiesto que se puede desarrollar un programa de producción clonal en *E. globulus* exitoso y económicamente viable, cuando se realizan los esfuerzos adecuados.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Ence por permitir el desarrollo y ajuste de las técnica de propagación descripta; a Susana Iglesias y Fernando Balbás por su asistencia en la mejora del proceso productivo; y a los colegas que participaron en la revisión del manuscrito por los comentarios aportados.

REFERENCIAS

Assis, T. de, 2001. Evolution of technology for cloning *Eucalyptus* in large scale. En: "Developing the eucalypt of the future" CD Proceedings of IUFRO Conference, 10-15 September 2001, Valdivia, Chile.

Borralho, N. M. G. y Wilson, P. J., 1994. Inheritance of initial survival and rooting ability in *Eucalyptus globulus* Labill. stem cuttings. *Silvae Genetica* 43 (1): 238-242.

Campinhos, E. e Ikemori, Y. K., 1983. Nova técnica para a produção de mudas de essências florestais. *IPEF* 23: 47-52.

Cañas, I.; Soria, F.; Lopez, G.; Astorga, R. y Toval, G., 2004. Genetic parameters for rooting trait in *Eucalyptus globulus* (Labill.). En: "Eucalyptus in a changing world" Proceedings of IUFRO Conference, 11-15 October 2004, Aveiro, Portugal. Pp: 159-160.

Cañas, I.; Soria, F. y Toval, G., 1994. Producción clonal de *Eucalyptus globulus* en la provincial de Huelva. *Montes* 37: 41-44.

Costa e Silva, J.; Dutkowski, G. W. y Borralho, N. M. G., 2005. Across-site heterogeneity of genetic and environmental variances in the genetic evaluation of *Eucalyptus globulus* trials for height growth. *Annals of Forest Science* 62: 183–191.

Chaperon, H., 1984. Influence of propagation by cuttings on the breeding strategy of forest trees. En: Barnes RD, Gibson GL (eds). "Provenance and genetic improvement strategies in tropical forest trees" Proceedings IUFRO Conference, Mutare. Pp: 135-148.

Eldridge, K.; Davidson, J.; Harwood, C. y van Wyk, G., 1993. *Eucalypt Domestication and Breeding*. Clarendon Press, Oxford.

England, N., 2007. Tree improvement and cuttings propagation of *Eucalyptus globulus* at Albany Forestry Research Centre. En: The Australasian Forest Genetics Conference, Hobart from 11 - 14 April 2007 (Disponibile en: <http://proceedings.com.au/afgc/>) [29 de Septiembre de 2012]

England, N. y Borralho, N. M. G., 1995. Heritability of rooting success in *Eucalyptus globulus* stem cuttings. En: BM Potts, NMG Borralho, JB Reid, RN Cromer, WN Tibbits, CA Raymond (Eds.) 'Eucalypt plantations: Improving Fibre Yield and Quality', Proceedings CRCTHF-IUFRO Conference, 19-24 Febrero. Hobart, Australia. Pp: 237-238.

Franclet, A., 1956. Premier travaux d'Amélioration génétique des *Eucalyptus*. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc* 4: 65-85.

Griffin, A. R., 2011. Clonal forestry – Is it always the best deployment option? En: Proceedings IUFRO Conference, 14-18 Noviembre 2011, Porto Seguro, Brasil. Pp: 58.

Lemos, L.; Carvalho A.; Araújo, J.A. y Borralho, N.M.G., 1997. Importance of additive genetic and specific combining ability effects for rooting ability of stem cuttings in *Eucalyptus globulus*. *Silvae Genetica* 46: 307-308.

López, G. A.; Potts, B. M.; Dutkowski, G. W. y Rodriguez Traverso, J. M., 2001. Quantitative genetics of *Eucalyptus globulus*: Affinities of land race and native stand localities. *Silvae Genetica* 50 (5-6): 244-252.

López, G. A.; Cañas, I. y Ruiz, F., 2010. Vegetative propagation techniques and genetic improvement in *Eucalyptus globulus*. En: Gil L., Tadesse W., Tolosana E., Lopez R. (Eds). Proceedings of the Conference on Eucalyptus management, history, status and trends in Ethiopia 15-17 Sep, 2010, Addis Ababa, Ethiopia. Pp: 246-255.

Majada, J. P.; Lopez, G. A.; Neves, L. y Araujo, C., 2012. *Eucalyptus globulus* Labill. En: Ocaña L. *et al.* (Eds). Producción y manejo de semillas y plantas forestales. INIA, Ministerio de Educación y Ciencia: Madrid. Pp: 462-491.

Rezende, G. D. S. P., 2009. Clonal forestry of *Eucalyptus*: Europe and South America. In: Vegetative propagation and deployment of varieties – the scope for Europe. 21-23 April, 2009. Liverpool, UK.

Soria, F., 2003. Mejora genética de *Eucalyptus globulus* ssp *globulus* en áreas marginales. La experiencia clonal de Ence. Proceedings Simposio Iberoamericano de *Eucalyptus globulus*, 30-31 Octubre, 2003, Montevideo, Uruguay.

Wilson, P.J., 1993. Propagation characteristics of *Eucalyptus globulus* Labill, ssp. *globulus* stem cuttings in relation to their original position in the parent shoot. Journal of Horticultural Science 68(5): 715-724

Zobel, B.J., 1993. Clonal forestry in the Eucalypts. En: Ahuja, M. R.; Libby, W. J. (Eds.) Clonal forestry: conservation and application. Budapest: Springer-Verlag. Pp: 139-148.



9. MICROPROPAGACIÓN DE *Eucalyptus globulus*

Oriana Ortiz N.¹

INTRODUCCIÓN

Entre las especies de maderas duras, las plantaciones de *Eucalyptus* son actualmente las más importantes a nivel mundial, tanto en superficie como en volumen de madera. De las seis principales especies de *Eucalyptus* utilizadas en plantaciones a gran escala, *E. globulus* es la que posee la fibra de mejores características para la elaboración de pulpa, tanto en términos de menores costos de producción como de facilidad de operación en las fábricas de celulosa (Borralho, 2011).

En Chile, *Eucalyptus globulus* es una especie muy atractiva para los productores y empresas forestales, dada su baja edad de rotación y sus características pulpables. En el país, existen más de 500 mil hectáreas de plantaciones de esta especie actualmente y su uso principal es la producción de pulpa en rotaciones cortas. Los mejores crecimientos de esta especie, se registran en la costa de la Región del Biobío, alcanzando incrementos de hasta 58 y 76 m³/ha/año en algunos sectores, también se han observado tasas de crecimiento interesantes en suelos trumaos de la precordillera y en suelos profundos de la Región de Los Ríos, siendo la baja tolerancia al frío de *E. globulus*, la principal limitante para la expansión de sus plantaciones hacia el Sur y Precordillera Andina (Gutiérrez *et al.*, 2001).

La silvicultura y el mejoramiento genético son herramientas esenciales en la búsqueda permanente del aumento de la productividad. Es conocido que, a nivel mundial, la productividad de las plantaciones de *Eucalyptus*, como resultado de los avances logrados en silvicultura y mejoramiento genético, se incrementa en un 10 a 20% en cada rotación, y las perspectivas son que esta siga aumentando gracias al desarrollo de nuevas formas de combinar la investigación silvícola y genética y su aplicación bajo consideraciones de sustentabilidad ambiental, económica y social (Moraes *et al.*, 2011).

La necesidad de un manejo intensivo, para maximizar el rendimiento y uniformidad de las plantaciones, ha determinado que la propagación vegetativa sea un elemento clave de las estrategias de mejoramiento genético (Libby, 2000), dado su potencial para la captura y transferencia de combinaciones específicas de genes, a plantaciones comerciales (Watt *et al.*, 2003).

La propagación vegetativa ha sido la forma tradicional de reproducción de álamos y sauces, que son especies que presentan facilidad para el enraizamiento de estacas. Sin embargo, en la mayoría de las especies forestales, sus características biológicas hacen que este tipo de propagación sea difícil, especialmente cuando los árboles han alcanzado la madurez, que es cuando puede ser evaluada su superioridad genética en el contexto de un programa de mejoramiento genético.

¹ Ingeniero Forestal. Oriana1.ortiz@gmail.com

Algunas especies del género *Eucalyptus* son relativamente fáciles de propagar vegetativamente, pero otras, como es el caso de *E. globulus*, son recalcitrantes a este tipo de reproducción (Borrallho, 2011), presentando solo un pequeño porcentaje de árboles que puede ser propagado vegetativamente (Wilson, 1998a). Actualmente, solo es factible económicamente la propagación a gran escala de clones de fácil enraizamiento, lo cual constituye un número muy pequeño del total de árboles. Por otro lado, aún se conoce muy poco acerca de cómo se producen exactamente los procesos internos que conducen a la formación de un nuevo sistema radicular en plantas generadas a partir de estacas (Assis et al., 2004)

De esta manera, la propagación mediante estacas de *E. globulus* (macropropagación) se encuentra limitada por la alta variabilidad del enraizamiento entre clones y el descenso gradual de la capacidad de enraizamiento con la edad de las plantas madres. En las últimas décadas, técnicas basadas en el cultivo de tejidos o micropropagación han abierto nuevas vías que ofrecen interesantes perspectivas para mejorar el enraizamiento en genotipos selectos recalcitrantes o de difícil propagación (Yasodha et al., 1997), revertir y mantener la juvenilidad fisiológica en árboles adultos (Rodríguez et al., 2005) y obtener altas tasas de multiplicación en un corto período de tiempo. Además, la micropropagación es la única vía por la cual es posible regenerar plantas transformadas genéticamente (Walter y Menzies, 2010).

En el presente capítulo se revisará la importancia de la silvicultura clonal y su influencia sobre el incremento de la productividad de las plantaciones, las ventajas y aplicaciones en este contexto que ofrecen las técnicas de micropropagación, la regeneración de plantas mediante organogénesis y embriogénesis somática, y finalmente se discutirán las limitaciones actuales y proyecciones del cultivo *in vitro*, enfocadas en plantaciones de alto rendimiento de *E. globulus*.

IMPORTANCIA DE LA SILVICULTURA CLONAL

La silvicultura clonal se refiere a plantas propagadas vegetativamente (clones) que son establecidas en plantaciones forestales. El material normalmente es obtenido desde estacas enraizadas, pero también puede ser producido utilizando técnicas de micropropagación, ya sea mediante organogénesis o embriogénesis somática u otro método.

Los clones son comunes en la naturaleza y se han usado por mucho tiempo, como una herramienta de domesticación en plantaciones forestales a gran escala, particularmente en especies de álamos y sauces. La propagación vegetativa de árboles ha sido aplicada por cientos de años para reproducir clones superiores de árboles frutales, por lo tanto no es una técnica de desarrollo reciente, sino que el ser humano cuenta con una larga experiencia en la clonación de árboles (Lindgren, 2001).

Mediante la silvicultura clonal se pueden lograr aumentos sustanciales en el rendimiento de los productos obtenidos de las plantaciones (Roberds y Bishir, 1997), debido a que se basan en la utilización de árboles superiores, que han sido seleccionados en programas de mejoramiento por sus características genéticas superiores, las cuales pueden ser una mayor tasa de crecimiento, mejores propiedades de la madera, resistencia a enfermedades, tolerancia a la sequía, u otras características deseadas.

En los esquemas clonales de silvicultura es posible utilizar la especificidad de un clon

para potenciar el rendimiento en un sitio específico o bien emplear clones de gran capacidad de adaptación a variadas condiciones de sitio. De esta manera, la silvicultura clonal permite aumentar la productividad de los sitios forestales, mejorar la calidad y uniformidad del producto final y reducir la edad de cosecha (Carpinetti, 2005; Libby y Rauter, 1984). Por ejemplo, en Brasil el uso de silvicultura clonal ha permitido aumentar la productividad de las plantaciones desde 15 m³/ha/año (plantas de semilla) a 55 m³/ha/año en plantaciones clonales del híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* (Moraes et al., 2011)

Desde el punto de vista del mejoramiento genético, la clonación de los individuos superiores ha llegado a ser un componente esencial de los programas de mejoramiento forestal (Zobel y Talbert, 1988), debido a que permite capturar y transferir rápidamente las ganancias genéticas, obtenidas en cualquier etapa de los programas de mejora a plantaciones comerciales (Kleinschmit et al., 1993; Mac Rae y Cotteril, 1997), lo que es de vital importancia, pues el extenso ciclo de vida de los árboles determina que un programa de mejora clásico requiera de mucho tiempo para su desarrollo. Además, esta habilidad para capturar las ganancias genéticas (aditivas y no aditivas) permite la multiplicación a gran escala de plantas que exhiben combinaciones específicas de genes o plantas híbridas, las cuales es prácticamente imposible de reproducir mediante semillas (Potts et al., 1992). Por esta razón, es posible obtener altas ganancias en aquellas características deseables que, por su baja heredabilidad, no se traspasan eficientemente a la descendencia por vía sexual (Gutiérrez, 2005).

En el futuro, se espera que el uso de árboles propagados vegetativamente, manejados intensivamente en plantaciones de alto rendimiento, se incremente sostenidamente en todas las regiones del mundo (Walter y Menzies, 2010)

Los riesgos asociados a la silvicultura clonal son mayormente del tipo biológico, principalmente el ataque de patógenos o insectos, o bien daños por efecto de eventos climáticos. De acuerdo a un estudio de análisis de riesgos efectuado por Roberds y Bishir (1997), la utilización de 30 a 40 clones no emparentados provee protección suficiente contra pérdidas catastróficas, resultando equivalente al uso de un gran número de clones no emparentados. Incluso, Burdon y Aimers-Halliday (2006) determinaron que la utilización de un número superior a 20 clones no emparentados provee una protección al riesgo que es marginal y que incluso puede comprometer en forma significativa las ganancias genéticas esperadas. Los mismos autores señalan que la elección del número de clones a considerar en una plantación clonal se encuentra sujeta a varias consideraciones, entre ellas la naturaleza del daño, la epidemiología del patógeno o insecto, el régimen silvícola y la logística para la cosecha de plantaciones afectadas.

A pesar del riesgo asociado a la silvicultura clonal, Alfenas et al. (2011) recalcan que no se debe restar importancia a la clonación, como una herramienta necesaria para la multiplicación de genotipos superiores que son resistentes a enfermedades, y que la generación continua de nuevos clones en programas de mejoramiento, con nueva información genética, es esencial para minimizar este riesgo. Wingfield et al. (2011) señalan que en el futuro se espera que el empleo de técnicas de genética molecular mejoren el conocimiento de las poblaciones de patógenos y sus agentes biológicos de protección, además de facilitar la selección temprana de individuos resistentes, y que la clave para una silvicultura clonal sustentable de *Eucalyptus*, depende de la inversión que se destine a la investigación y desarrollo en una visión de largo plazo.

VENTAJAS Y APLICACIONES DE LA MICROPROPAGACIÓN

Las plantas pueden ser reproducidas mediante dos ciclos de vida; sexual y asexual. En el ciclo sexual, las plantas se originan de la fusión de dos gametos parentales y se desarrollan a partir de embriones cigóticos contenidos dentro de semillas o frutos. Generalmente, estas plantas serán variables en su fenotipo, ya que cada una de ellas representa una nueva combinación de genes (George y Debergh, 2008).

En el ciclo asexual (vegetativo), las características únicas de un genotipo seleccionado para propagación (comúnmente llamada planta madre, planta stock u ortet) se perpetúan, debido a que durante la división de las células (mitosis) los genes normalmente son copiados en forma exacta en cada división mitótica. A un grupo de plantas reproducidas asexualmente (rametos), se le denomina clon (George y Debergh, 2008).

Las semillas tienen la ventaja de un menor costo por unidad de planta producida, es posible almacenarlas por un período de tiempo y son fáciles de recolectar y transportar (Jha y Ghosh, 2005), además generan plantas libres de virus, debido a que muchas de estas enfermedades usualmente no son transmitidas a través de semillas (Sadhu, 1989). Sin embargo, algunas plantas no producen semillas viables o lo hacen después de un largo período juvenil y aunque no es imposible, generar progenies genéticamente idénticas usando semillas, es un proceso muy difícil y de alto costo (Jha y Ghosh, 2005). En este sentido, la propagación vegetativa es la única forma posible de perpetuar y multiplicar individuos únicos con características deseables.

El enraizamiento de estacas es la técnica de propagación vegetativa más utilizada en aquellas especies que presentan facilidad para este tipo de reproducción (Hartmann *et al.*, 2002). El método tiene la ventaja de ser simple y de un menor costo relativo. En el último tiempo, las técnicas tradicionales de macropropagación, como comúnmente se las denomina, han sido refinadas y mejoradas a través del uso de invernaderos con condiciones controladas, la aplicación de nebulizaciones para prevenir el desecamiento de las estacas, la generación de nuevos sustratos para el enraizamiento y el control de la temperatura en la base de la estaca, lo cual ha permitido aumentar considerablemente la tasa de multiplicación y hacer más eficiente el proceso (George y Debergh, 2008). En el caso de *Eucalyptus* tropicales el manejo intensivo de las plantas madres en condiciones de invernadero ha sido crucial para la propagación a gran escala de estas especies (Assis *et al.*, 2004).

Aun cuando hoy en día continúa la investigación orientada a mejorar las técnicas de macropropagación los avances se han ralentizado, ya que por un lado la atención ha sido puesta en el desarrollo de técnicas de micropropagación y, por otro, se espera que los mayores avances en el mejoramiento del enraizamiento provengan del campo de la genómica y de la ingeniería genética de plantas. La micropropagación o cultivo de tejidos es una técnica en la cual pequeños trozos de tejidos son removidos de la planta donante para cultivarlos asépticamente en un medio nutritivo (Bonga y Durzan, 1982). De acuerdo a George y Debergh (2008), la micropropagación ofrece una serie de ventajas potenciales respecto de los métodos convencionales de propagación asexual:

- Los cultivos se inician por medio de la utilización de pequeños segmentos de la planta madre, por lo tanto es un método que no destruye la planta o árbol original.

- Se requiere relativamente poco espacio para la mantención de los cultivos, ya que solamente se propagan brotes pequeños o embriones. La multiplicación de estas estructuras usualmente se realiza en ciclos cortos de 2 a 4 semanas y cada ciclo resulta en el aumento en forma exponencial del material cultivado.

La propagación es llevada a cabo en condiciones asépticas. Una vez que los cultivos han sido establecidos no debieran ser afectados por procesos de contaminación, además las vitroplantas producidas debieran estar libres de bacterias, hongos u otros microorganismos.

- Actualmente existen diversos métodos, que permiten eliminar enfermedades provocadas por virus en los cultivos micropropagados. Estas metodologías comúnmente son aplicadas para detectar la presencia de virus en explantes que serán utilizados para el establecimiento de cultivos *in vitro* y para certificar material libre de virus a plantas o genotipos que serán propagados a gran escala.
- La micropropagación, es muy apropiada cuando se necesita producir un gran volumen de plantas, debido a que es posible ajustar en forma más flexible los factores que influyen la regeneración vegetativa, como niveles de nutrientes y reguladores de crecimiento. Así, la tasa de multiplicación es mucho más alta que en sistemas de enraizamiento de estacas, lo cual hace factible la producción de muchas más plantas en un período de tiempo dado.
- Cuando se requiere poner en el mercado nuevas variedades selectas, la micropropagación posibilita acelerar la disponibilidad de plantas, dado el mayor número de unidades que es posible producir en un corto período de tiempo.
- Es posible propagar clones cuando es muy lento, difícil, o incluso imposible, propagarlos por los medios tradicionales de propagación sexual.
- El material reproducido vegetativamente puede ser almacenado por largos períodos de tiempo, en una fase juvenil, lo cual es de mucha importancia en la propagación de especies forestales.
- La producción de plantas puede realizarse durante todo el año, debido a que el sistema de producción es independiente de los cambios estacionales.
- Se requiere de menor energía y espacio, tanto para la propagación de plantas como para la mantención de material genético.
- El material vegetal, necesita menor atención entre subcultivos, lo cual implica una economía tanto en recursos humanos como en insumos, ya que no requiere de riego, control de malezas, fertilización y otros cuidados, por lo tanto en este aspecto la micropropagación es menos costosa que los métodos tradicionales.

Villalobos y Thorpe (1991) agregan que el material *in vitro* se encuentra sujeto a menores restricciones sanitarias para su transporte de un país a otro, lo cual facilita la importación y exportación de material genético. La técnica también ofrece la posibilidad de multiplicar rápidamente un clon del cual existe un número reducido de réplicas, como podría ser el caso de los híbridos forestales. Mc Comb y Bennet (1986) y Franclet *et al.* (1987) indican que las técnicas de micropropagación, particularmente la organogénesis somática,

constituyen una de las vías más eficaces para la reversión y mantención de la juvenilidad fisiológica en árboles adultos.

Los principales campos de aplicación de la micropropagación, de acuerdo a Razdan (2003), se encuentran en los ámbitos del mejoramiento genético y de los sistemas de producción agrícolas y forestales. Los programas de mejora pueden ser acelerados y potenciados a través del uso de técnicas que permiten la producción de haploides y triploides, polinización y fertilización *in vitro*, cultivo de embriones cigóticos, hibridación e hibridación somática, transformación genética y selección de genotipos con variación somaclonal y gametoclinal. Cabe destacar que la micropropagación es la única forma posible de regenerar plantas originadas a partir de estas técnicas.

Bonga y Durzan (1982) estiman que el potencial para usar la micropropagación en la industria forestal es considerable y que las aplicaciones más probables son la clonación en masa de genotipos selectos, producción de clones libres de enfermedades y almacenamiento de germoplasma, para la conservación de la diversidad genética. Razdan (2003) añade a estas la elaboración de productos naturales mediante la producción de metabolitos secundarios.

En general, se reconoce que los árboles son difíciles de regenerar bajo condiciones *in vitro* (Giri *et al.*, 2004) y, aun cuando numerosas especies forestales cuentan con metodologías específicas de cultivo *in vitro*, en muchos casos estas no son aplicables en la práctica o son económicamente inviables (Altman, 2003), por lo tanto se requiere continuar con el mejoramiento de los procedimientos desarrollados y fomentar su escalamiento comercial.

En el caso del mejoramiento genético de especies forestales los principales obstáculos para su desarrollo se relacionan con el largo ciclo de vida de los árboles, el extenso período de tiempo que transcurre entre la germinación de las semillas y el inicio de la floración, la alta heterocigosidad, el sistema de cruzamiento de los árboles, y con que muchas de las características de interés productivo pueden ser evaluadas solamente cuando el árbol ha alcanzado la madurez (Altman, 2003; Campbell *et al.*, 2003). Lo anterior incide en que el desarrollo de los programas clásicos de mejora, sea más bien lento y menos productivo que en sistemas agrícolas (Giri *et al.*, 2004). En este contexto, los distintos métodos de micropropagación y sus aplicaciones potencialmente pueden proporcionar una gran variedad de alternativas para superar las limitantes actuales, por ejemplo es posible efectuar hibridación parasexual a través de la fusión de protoplastos, forzar la floración *in vitro* para la producción y selección de nuevos genotipos, usar mutaciones inducidas para aumentar la variabilidad genética, explotar la variación somaclonal, generar poliploides, utilizar la selección asistida por marcadores moleculares, insertar genes, entre muchas otras (Altman, 2003; Tzfira *et al.*, 1998; Blakesley *et al.*, 2002).

De esta manera, se prevé que la atención sea puesta en el desarrollo de árboles modificados en su composición y contenido de lignina, en el mejoramiento de la forma del árbol, en el desempeño y crecimiento, en la resistencia a plagas y enfermedades, en la restricción del flujo de genes (árboles estériles), y en la tolerancia a los estreses abióticos y conservación de germoplasma. También serán importantes aspectos como la generación de bioenergía, la fitorremediación, la producción de metabolitos secundarios, los biomateriales y los bioplásticos, y la utilización de organismos simbioses (micorrizas) (Altman, 2003; Campbell *et al.*, 2003; Altman y Hasegawa, 2012).

Si bien la biotecnología tiene el potencial de abrir nuevas posibilidades y proveer nuevas herramientas para el mejoramiento convencional, no debe ser tomada como un sustituto de los programas de mejora (Griffin, 1996), ya que los avances de la biotecnología solo se pueden capitalizar si se dispone de información y conocimientos biológicos básicos y si se encuentran operando programas idóneos de mejoramiento y conservación genética (Palmberg-Lerche y Ball, 1998). Por otro lado, el desarrollo y aplicación de las herramientas biotecnológicas, se enfrenta a ciertos obstáculos, relacionados con el surgimiento de una oposición a las plantaciones de rápido crecimiento, la adopción de esquemas de eco-certificación de bosques y temores acerca de la biotecnología, especialmente de la transformación genética en árboles (Fenning y Gershenzon, 2002).

TÉCNICAS DE MICROPROPAGACIÓN

Todos los métodos de propagación *in vitro* se basan en una propiedad de las plantas llamada totipotencia celular, la cual permite la regeneración de la planta completa desde células individuales o grupo de células contenidas en tejidos u órganos (Altman y Loberant, 1998). De acuerdo a Ahuja (1983) y Walter y Menzies (2010) la micropropagación puede ocurrir a través de dos procesos, organogénesis somática y embriogénesis somática.

La organogénesis somática implica la formación de estructuras monopolares que establecen conexión vascular con el tejido del cual derivan y su origen es multicelular (Pierik, 1990). La organogénesis involucra la diferenciación de brotes y raíces en períodos distintos durante el desarrollo de la vitroplanta. Usualmente, los brotes *in vitro* son inducidos sobre tejidos dispuestos en un medio enriquecido con citoquininas y posteriormente los explantes son enraizados en un medio enriquecido con auxinas. Los cultivos son mantenidos en frascos o envases sellados durante todo el proceso de multiplicación y en ambientes controlados con iluminación artificial, fotoperiodo y temperatura. La organogénesis se encuentra influenciada por el genotipo, el estado fisiológico del explante, la edad y las condiciones *in vitro* de luz, temperatura y constitución del medio nutritivo, en especial de las concentraciones hormonales (Ahuja, 1983).

De acuerdo a Sabja (1988) dentro de la organogénesis los sistemas más empleados en especies forestales corresponden a la producción de brotes axilares y brotes adventicios.

La proliferación de brotes axilares ocurre a partir de yemas que se encuentran en las axilas de las hojas, pero que debido al control apical normalmente no se desarrollan en las plantas hasta que el tallo se elonga y crece. Pequeños trozos de tallo (segmentos nodales o apicales) contienen muchas yemas axilares inactivas en distintos estados de desarrollo, las cuales crecen extensivamente cuando son cultivadas en un medio nutritivo apropiado, que usualmente contiene altas concentraciones de citoquininas. El corte del explante y el medio enriquecido con citoquininas activan las yemas, conduciendo a la proliferación de múltiples brotes axilares. Luego de la inducción, estos brotes son separados para continuar con el cultivo (Altman y Loberant, 1998).

Los brotes adventicios se originan de la formación de tejido meristemático y la posterior diferenciación de ápices (Villalobos y Thorpe, 1991). El inicio de los brotes adventicios se puede producir directamente del explante (organogénesis directa), a partir de células del parénquima que están situadas ya sea en la epidermis o justo bajo la superficie del tallo, o indirectamente a partir del callo que se forma en la superficie cortada del explante

(organogénesis indirecta), y el proceso implica la iniciación de un callo basal en los brotes separados en cultivo y la posterior formación de brotes adventicios en la periferia del callo, que inicialmente no se encuentran conectados al tejido vascular del explante (Pierik, 1990; Gómez, 2004). Una apropiada organización y diferenciación incluye la formación de una conexión vascular funcional entre el brote en desarrollo y las raíces, lo que finalmente origina una nueva vitroplanta (Altman y Loberant, 1998).

Según George y Debergh (2008) los explantes en cultivo no siempre se originan por un único método, por ejemplo en el cultivo *in vitro* de brotes, además de brotes axilares, algunas veces se pueden encontrar brotes adventicios formados directamente de tallos u hojas o indirectamente desde el callo de la base del explante. Desde el punto de vista de la estabilidad genética se considera que los métodos más seguros son la formación de brotes axilares y adventicios, ya que la organización de meristemas desde células del callo puede conllevar la ocurrencia de mutaciones genéticas y/o formación de quimeras, lo cual origina un nuevo genotipo, distinto al original (Altman y Loberant, 1998).

La micropropagación vía embriogénesis somática involucra el desarrollo de embriones desde una célula o un grupo de células somáticas *in vitro*, competentes embriogénicamente. A diferencia de la organogénesis, donde los brotes y raíces se desarrollan en diferentes medios nutritivos, la embriogénesis somática origina embriones bipolares (presentan un ápice caulinar y otro radicular), que generan en forma simultánea la parte aérea y radicular de una planta, a través de una serie de etapas similares a la formación de embriones cigóticos (Ahuja, 1983; Thorpe *et al.*, 1991). A medida que se desarrollan los embriones somáticos, las células meristemáticas rompen cualquier conexión citoplasmática o vascular con las células circundantes y crecen como una estructura aislada, por lo tanto es muy fácil separar los embriones somáticos de un explante (Rai, 2007).

El proceso de embriogénesis contempla la iniciación del tejido embriogénico, multiplicación, desarrollo, maduración y germinación de embriones, formación de la planta y su posterior aclimatación a condiciones ambientales normales. El tejido puede ser mantenido o multiplicado en un estado relativamente indiferenciado (Walter y Menzies, 2010).

Las ventajas de esta técnica se relacionan con sus altos coeficientes de multiplicación, la posibilidad de automatización del proceso en bio-reactores, ya que los embriones pueden ser cultivados en medio líquido, y la generación de semilla artificial mediante la encapsulación de los embriones. Adicionalmente, estas estructuras exhiben una gran aptitud para su almacenamiento a largo plazo en nitrógeno líquido (Ahuja, 1983; Wang *et al.*, 1993).

En base a estas potencialidades, se ha identificado a la embriogénesis somática como una de las técnicas que presentan las mejores opciones para reducir el costo de producción de las plantas regeneradas vegetativamente. Se ha estimado que un litro de cultivo embriogénico de coníferas puede contener aproximadamente 100.000 embriones somáticos (Becwar *et al.*, 1988).

ORGANOGENESIS SOMÁTICA EN *E. globulus*

Murashige (1974) definió una secuencia de tres pasos o etapas para la organogénesis; establecimiento de cultivos asépticos, multiplicación de propágulos y preparación de los propágulos para su transferencia y viverización en condiciones normales (aclimatación).

Estos pasos han sido ampliamente adoptados tanto por laboratorios de investigación como comerciales, ya que no sólo describen el proceso, sino que también representan puntos en los cuales es necesario cambiar las condiciones de los cultivos. Debergh y Maene (1981) definieron como una etapa separada la selección de la planta madre o fuente de explantes, debido a su gran influencia sobre el éxito de la micropropagación. De acuerdo a George y Debergh (2008) y Rai (2007) actualmente se reconocen cinco etapas principales en el proceso de organogénesis o micropropagación:

- Etapa 0: Selección y mantención de plantas o material para ser utilizado como fuente de explantes iniciales.
- Etapa I: Desinfección y establecimiento de explantes en medios nutritivos adecuados. El objetivo de esta etapa es introducir los explantes a condiciones *in vitro*, evitando la contaminación y suministrando un ambiente que promueva la producción de brotes. Usualmente son necesarias 4 - 6 semanas para completar esta etapa, sin embargo algunas especies leñosas pueden requerir un período mayor a 12 meses, período que se denomina de estabilización (Mc Cown, 1986). Se considera que un cultivo se encuentra estabilizado, cuando los explantes producen un número constante de brotes normales, luego del subcultivo (Hartman *et al.*, 2002)
- Etapa II. Multiplicación de brotes sobre medios nutritivos definidos. Generalmente, los brotes son subcultivados cada 2 - 8 semanas.
- Etapa III. Enraizamiento de los brotes regenerados *in vitro*. Satyanarayana y Varghese (2007) indican que en algunas especies es necesario previamente producir explantes elongados (Etapa III a) preparados para el enraizamiento y solo entonces utilizar los medios de cultivos y/o métodos necesarios para inducir la formación de raíces adventicias, y que alternativamente los brotes o microestacas pueden ser enraizados en condiciones *ex vitro*, lo cual reduce los costos y produce raíces que son estructural y funcionalmente mejores que las producidas *in vitro*. En la micropropagación a gran escala se ha observado que la formación del sistema radicular bajo condiciones *in vitro* no es económicamente viable, por lo que en algunas empresas se ha sustituido esta fase por el enraizamiento de brotes en cámaras de humidificación (Villalobos y Thorpe, 1991)
- Etapa IV. Transferencia de las vitroplantas a sustrato para su aclimatación en invernadero. Sin la aclimatación las vitroplantas son incapaces de sobrevivir en condiciones ambientales normales, debido a que la alta humedad del ambiente confinado donde se desarrollan impide la formación de cera epicuticular en las hojas y el desarrollo de estomas funcionales y, además, las raíces adventicias recién formadas no son completamente funcionales (Satyanarayana y Varghese, 2007).

A continuación se revisarán las distintas etapas del proceso de organogénesis desarrollado para *Eucalyptus globulus*.

Fuentes de Explantes Iniciales y Establecimiento de Cultivos (Etapas 0 y I)

Para la especie *E. globulus* el método de micropropagación más utilizado es la proliferación de brotes axilares múltiples. El cultivo de material juvenil generalmente considera la utilización de semillas para el establecimiento de explantes libres de contaminación, siendo el procedimiento de desinfección relativamente sencillo.

Por ejemplo, la metodología seguida por Fett-Neto *et al.* (2001) contempla dos lavados de la semilla con agua destilada, para luego desinfectarla con una solución de etanol (70% v/v) por un minuto, seguida por la aplicación de NaOCl (1,5% v/v), adicionado con algunas gotas de detergente neutral, durante quince minutos en constante agitación, finalizando con cuatro enjuagues del material en agua destilada estéril.

Desde el punto de vista de la silvicultura clonal no tiene mucho sentido propagar material juvenil, ya que se desconoce cuál será su desempeño futuro en plantaciones. No obstante, con fines de investigación en *E. globulus*, se ha utilizado ampliamente material juvenil para realizar estudios sobre el efecto en el enraizamiento de la nutrición mineral (Schwambach *et al.*, 2005), la luz y la dinámica de los carbohidratos (Ruedell *et al.*, 2013) y auxinas (Martellet y Fett-Neto, 2005).

También se ha utilizado material juvenil para determinar el efecto de subcultivos sucesivos sobre la caulogénesis (Gómez *et al.*, 2007), la variación genética *in vitro* del enraizamiento (Ruaud *et al.*, 1999) y la propagación por medio de sistemas de inmersión temporal (González, 2011), entre otros aspectos.

En el caso del cultivo *in vitro* de material adulto, la desinfección de brotes de árboles adultos colectados directamente de terreno es difícil debido a la gran cantidad de contaminación (hongos, bacterias y esporas), tanto exógena como endógena, presente en este material (De Fossard *et al.*, 1977). Según, Le Roux y Van Staden (1991) es virtualmente imposible esterilizar este material sin dañar severamente los tejidos de los explantes iniciales.

La edad del material y la estación son factores importantes que determinan el éxito en el establecimiento de cultivos asépticos (Grewal *et al.*, 1980).

Idealmente, el material debiera tener muchas de las cualidades encontradas en brotes juveniles. Para estos efectos, en *E. globulus* se han desarrollado diversas técnicas de pretratamiento (Etapa 0) del material adulto, llegando a establecerse cultivos asépticos a partir de rebrotes de tocón (Bennett *et al.*, 1994 y 2004; Hartney, 1982), brotes de injertos (Durand-Cresswell *et al.*, 1982), brotes epicórmicos (Trindade y Pais, 1997; Ortiz y Koch, 2010) y plantas rejuvenecidas mantenidas en invernadero (González, 2011).

La iniciación de cultivos a partir de brotes epicórmicos ha sido empleada en varias especies de *Eucalyptus* (Ikemori, 1987; Yang *et al.*, 1996) y sus ventajas, respecto de otros métodos, se relacionan con la rapidez de su implementación y la generación de brotes fisiológicamente juveniles, que son más reactivos a las condiciones del cultivo *in vitro* que otro tipo de explantes (Ikemori, 1987).

Ortiz y Koch (2010) utilizaron brotes epicórmicos para el establecimiento de explantes iniciales, para ello colectaron desde 100 árboles selectos, grupos de 5-6 trozos de ramas de

2 a 4 cm de diámetro, los cuales fueron desinfectados y colocados en una sala con control de temperatura y fotoperiodo, adicionalmente se proporcionó una mayor humedad relativa, mediante el uso de humidificadores. Se obtuvo brotes epicórmicos en 47 de los clones selectos.

En la Figura N° 1 se puede observar algunas imágenes del procedimiento para generar este tipo de explante.

Para la desinfección de brotes, dependiendo de las características del material inicial, se han utilizado diversos tratamientos de desinfección, que generalmente consideran la aplicación de Hipoclorito de Sodio (NaOCL) en concentraciones que pueden fluctuar entre 1% y 10%, durante 3 a 20 minutos, seguido por tres o cuatro enjuagues con agua destilada estéril (Bennet *et al.*, 1994; Ortiz y Koch, 2010).

También se ha utilizado el remojo en fungicidas, como pretratamiento a la desinfección (Videla y Chung, 1996), la utilización de etanol e Hipoclorito de Calcio ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) en una concentración de 5% (Trindade y Pais, 1997).



Trozos de ramas desinfectados, mantenidos en sala climatizada (Izq. Arriba); Emergencia de brotes epicórmicos (Der. Arriba); Desinfección de brotes y cultivo (Izq. Abajo); Inicio de cultivos *in vitro* (Der. Abajo).

Figura N° 1
GENERACIÓN BROTES EPICÓRMICOS EN *E. globulus*, PARA UTILIZACIÓN EN INICIO DE CULTIVOS IN VITRO

Boulay (1983), al trabajar con distintas especies de *Eucalyptus*, indica que en la etapa de establecimiento de cultivos, comúnmente se presentaban los siguientes problemas:

- Reducido número de explantes iniciales disponibles por clon debido a la necesidad de utilizar técnicas de pretratamiento del material adulto.
- Solo un pequeño porcentaje de los explantes establecidos libres de contaminación

llega a activarse (formación de brotes axilares) y continúa creciendo en el medio de cultivo, el que puede fluctuar entre 2-40%. De esta manera las vitroplantas obtenidas desde los cultivos *in vitro* provienen de un pequeño número de explantes iniciales.

- Un número considerable de explantes desarrolla un callo café de textura friable, en lugar de formación de brotes axilares. Lo cual además se relaciona con la exudación de compuestos fenólicos, lo cual es evidente por el ennegrecimiento del medio de cultivo, del explante (muerte por necrosis) o ambos.
- También durante esta etapa puede ocurrir hiperhidricidad en los tejidos de los brotes formados *in vitro*.

Ortiz y Koch (2010), al trabajar con brotes epicórmicos de *E. globulus*, encontraron que la muerte de explantes iniciales por efecto de la contaminación y necrosis fue elevada, alcanzando un promedio de 47% por contaminación y 23% por necrosis. Se observó que *E. globulus* es muy sensible al agente desinfectante (NaOCl), aunque los tratamientos de desinfección consideraban dosis bajas del producto para minimizar la muerte por necrosis, pero se produjo un efecto adverso de una mayor contaminación por microorganismos. Esto coincide con lo reportado por Boulay (1983), Yasodha *et al.* (2001) e Ikemori (1987), este último señala un 71% de pérdida de explantes, por efecto de la contaminación durante el establecimiento de brotes epicórmicos de *E. grandis*. Por esta razón, de 47 clones iniciales desde donde se obtuvieron brotes epicórmicos, se establecieron explantes *in vitro* en 39 de ellos, siendo aquellos clones que exhibían menor producción de brotes y períodos más largos de emergencia los que presentaron mayor dificultad para la introducción de brotes libres de contaminación. De igual forma, del conjunto de 39 clones en que se establecieron explantes viables (libres de contaminación y menores porcentajes de necrosis), los que contaban con unos pocos brotes por clon exhibieron un mayor porcentaje de pérdida respecto de los que tenían un mayor número de explantes, lo cual implicó que no fuera posible proseguir con el proceso de multiplicación en 9 de los clones establecidos *in vitro*, resultados que coinciden con lo señalado por Boulay (1983).

De acuerdo a Le Roux y Van Staden (1991) en general para *Eucalyptus* se recomienda tomar las siguientes precauciones para reducir la producción de compuestos fenólicos:

- Selección de explantes juveniles que muestren crecimiento activo.
- Uso de procedimientos de esterilización que no dañen en forma severa los tejidos de los explantes. Lo cual puede requerir la transferencia del material del árbol donante a condiciones ambientales controladas, estableciendo altas medidas de sanitización.
- Lavar con agua de la llave las secciones del material a desinfectar por al menos durante una hora antes de la desinfección.
- Colocar los explantes en soluciones antioxidantes luego de la esterilización, antes de cultivarlos en el medio nutritivo.
- Incluir antioxidantes, tales como PVP (polyvinylpyrrolidone) y ácido ascórbico, en el medio de cultivo.
- Colocar los cultivos en la oscuridad por un período inicial de 7 a 14 días.

- Subcultivos frecuentes durante los primeros meses.

Para el establecimiento de explantes en *E. globulus* el medio nutritivo más utilizado es MS (Murashige y Skoog, 1962), especialmente en material juvenil, el cual puede ser modificado y reducido en su concentración de macronutrientes para disminuir su alta concentración salina durante esta fase de la micropropagación. Trindade *et al.* (1990) utilizaron con éxito el medio De Fossard suplementado con 1,11 ó 2,22 μM de BA (N^6 -benzyladenina) y 0,1 y 0,49 μM de AIB (Ácido Indolbutírico), en el establecimiento *in vitro* de brotes epicórmicos de *E. globulus*. Con los mismos resultados, Ortiz y Koch (2010) utilizaron los macro y micronutrientes del medio MS, complementadas con las vitaminas de White (1943), adicionado con 1 μM de BAP (6-Bencilaminopurina) y 0,01 μM de ANA (Ácido Naftalenacético) y suplementado con 100 mg/L de m-inositol, 6 g/L de agar y 3% de sacarosa. Bennet *et al.* (1994), establecieron *in vitro* rebrotes de tocón, en un medio compuesto por los minerales y vitaminas del medio MS, adicionado con 2% de sacarosa, 2,5 μM de BAP, 1,25 μM de ANA, 2,5 g/L de agar y 2,5 g/L de Gelrite ®.

Multiplicación (Etapa II) y Elongación de Brotes (Etapa III a)

En esta fase, el medio de cultivo más utilizado para la proliferación de brotes corresponde al medio MS (Ortiz y Koch, 2010; Bennett *et al.*, 1994 y 2004). También se ha usado el medio De Fossard (Trindade *et al.*, 1990; Trindade y Pais, 1997).

Trindade *et al.* (1990) encontraron que la aplicación exógena de citoquinina es el principal factor que controla la cantidad y calidad de los brotes de *E. globulus* inducidos *in vitro*, y que bajas concentraciones de BAP (0,4-1,1 μM) producían una alta tasa de multiplicación de brotes, solo cuando se encontraba combinada con auxinas, ya que éstas parecían compensar los bajos niveles de citoquininas.

En el mismo estudio, BAP fue más efectivo que Kinetina (6-furfurylaminopurine) para promover la formación de brotes, obteniéndose las tasas más altas de multiplicación, cuando se utilizó el medio nutritivo De Fossard adicionado con 1,1 o 2,2 μM de BAP y 0,5 μM de AIB. Bennet *et al.*, (1994) indican que microtallos cultivados en medios de cultivos que alternaban las citoquininas (BAP) y Kinetina mostraban mejor crecimiento que aquellos cultivos en los cuales las citoquininas fueron usadas continuamente, no obstante Trindade y Pais (1997) al utilizar otro medio nutritivo, descartaron el uso de Kinetina sola o en combinación con BAP, debido a la coloración rojiza que adquirirían los microtallos.

Por otro lado, la hormona 2 iP (6-(dimethylallylamino)-purine) al usarla alternada con BAP, de acuerdo a Bennet *et al.* (1994), aunque no promovía la proliferación de brotes de la misma forma que BAP y Kinetina, reducía la caída de hojas y la coloración rojiza de los explantes.

El material juvenil de esta especie se caracteriza por ser muy reactivo, por lo que su multiplicación es muy rápida, al contrario el cultivo de material adulto es un proceso más lento, donde se requiere de varios meses para obtener tasas de proliferación altas y estables, lo cual es un indicador del nivel de rejuvenecimiento de los tejidos.

Trindade y Pais (1997) señalan que el proceso varía de clon a clon, pero que usualmente este requiere de un período mínimo de 8 a 12 meses de subcultivos frecuentes. Igualmente, Ortiz y Koch (2010) encontraron que en material adulto (brotes epicórmicos) la

activación de los explantes viables a una fase de multiplicación fue gradual dependiendo del clon.

De acuerdo a Mc Cown y Mc Cown (1987) y Bennet (1994) la duración del período requerido para la estabilización de los cultivos varía con las especies y la edad del material inicial, por lo que cultivos de material adulto pueden requerir un largo período de estabilización antes que el enraizamiento sea posible

En un estudio realizado para conocer el efecto de los subcultivos sobre la caulogénesis o formación de brotes (Gómez *et al.*, 2007), efectuado sobre material juvenil, se observó una disminución de la cantidad de microtallos formados a partir del 6° subcultivo, que fue acompañada por una compactación general de los macizos de proliferación.

Este efecto se revirtió cuando los macizos fueron mantenidos en un medio MS libre de hormonas por 30 días para su posterior transferencia a medios de proliferación de brotes. Para la multiplicación de brotes, se utilizó el medio MS, adicionado con 4,4 μM de BAP y 0,05 μM de ANA.

Al respecto, Le Roux y Van Staden (1991) señalan que en las especies de *Eucalyptus* la formación de yemas y tallos *in vitro* se produce frecuentemente sin elongación, lo cual resulta en densas agrupaciones de yemas. El proceso usualmente se asocia con el desarrollo de callo en la base del explante, en el lugar donde este se encuentra en contacto con el medio de cultivo.

Los mismos autores señalan que los brotes múltiples producidos *in vitro* pueden formarse tanto a partir del desarrollo de yemas preformadas como del desarrollo de yemas formadas de *novo* en cultivo (yemas adventicias verdaderas).

Específicamente en *E. globulus*, Ortiz y Koch (2010) encontraron que el medio de proliferación, aun cuando permitía obtener tasas de multiplicación altas y formación de brotes vigorosos de color verde intenso, la tasa de formación de brotes elongados en él era baja, más bien la tendencia general de los clones ensayados fue la formación de tallos cortos con hojas anormales en densas formaciones, como los que se muestra en la Figura N° 2, los cuales resultan no ser apropiados para el enraizamiento, siendo necesaria la utilización de medios especiales para inducir la formación de explantes elongados.

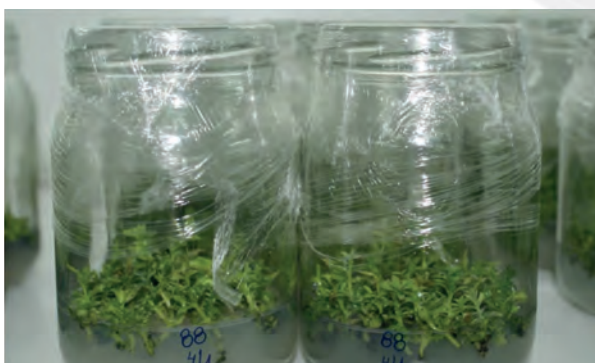


Figura N° 2
ASPECTO DE LOS CULTIVOS DE *E. globulus* EN MEDIO NUTRITIVO DE MULTIPLICACIÓN

Debido a este comportamiento de *E. globulus* en la etapa de multiplicación, a diferencia de otras especies, es difícil cuantificar la tasa efectiva de multiplicación, debido a la intensa proliferación y tamaño de los brotes. A modo de referencia, en *Eucalyptus* resistentes al frío, Boulay (1983) indica que la tasa de formación de brotes es de aproximadamente 4 a 5 brotes en cada subcultivo efectuado cada tres semanas, bajo condiciones de multiplicación exponencial. En *E. globulus*, bajo un sistema de proliferación de brotes axilares, se pueden obtener tasas sobre 4,2 en cada subcultivo. Trindade *et al.* (1990) señalan que una vez que los cultivos se encuentran estabilizados, no se aprecian diferencias entre clones en cuanto a su tasa de multiplicación, lo cual también fue reportado por Ortiz y Koch (2010), no obstante cada clon exhibía un fenotipo particular que permitía identificarlo *in vitro*.

La elongación de brotes puede ser realizada solo cuando los cultivos muestren tasas de multiplicación altas y estables. Se han desarrollado diversas alternativas para elongar los microtallos, la más común es reducir la concentración de BAP en el medio de cultivo (Ortiz y Koch, 2010; Videla y Chung, 1996). Calderón-Baltierra (1994) indica que un tratamiento hormonal con 0,3 μM GA3 (Ácido Giberélico) y 440 mg/L de calcio (normal en MS), seguido por un tratamiento de oscuridad, resulta apropiado para producir brotes elongados. Ortiz y Koch (2010) probaron tres medios de elongación, utilizando MS como medio base y variando su composición hormonal, el primero contenía 0,3 μM de BAP y 0,01 μM de ANA; el segundo 19,7 μM de 2 iP y el tercero 4,5 μM de 2,4 D (Ácido 2,4-Dichlorophenoxyacetic) y 1 μM de Kinetina, adicionado con carbón activo (1 g/L) y 50 ml de agua de coco; en ellos se observó una respuesta marcadamente clonal, donde algunos clones exhibieron altas tasas de formación de brotes elongados en los tres medios ensayados, otros respondieron bien a solo uno de ellos y otros cuya respuesta no fue satisfactoria para ninguno de los medios ensayados.

En este estudio se consideró como explante elongado aquel brote de tamaño superior a 2,5 cm, que mostraba crecimiento de hojas normales y ausencia de vitrificación, como los que se muestran en la Figura N° 3.

Los medios de elongación se utilizaron sólo por un período de subcultivo correspondiente a 20-40 días, ya que en caso contrario se producía la muerte de los explantes. El traspaso al medio de multiplicación base permitió la revigorización de los brotes y su mantención en buenas condiciones, en una fase de multiplicación permanente.



Figura N° 3
MICROTALLOS ELONGADOS DE *E. globulus*

En los trabajos de Bennett *et al.* (1994 y 2004) y Trindade y Pais (1997) no se menciona la utilización de medios de elongación y tampoco es usual su empleo en aquellos estudios donde se utiliza material juvenil; en el primer caso puede ser producto de la composición de clones ensayados, los cuales no son más de 3 ó 5 clones y que probablemente exhibían cierta facilidad para la elongación, además en el estudio de Trindade y Pais (1997) el sistema de enraizamiento utilizado (enraizamiento sucesivo) permite la elongación posterior del tallo en el medio libre de hormonas (Boulay, 1983). En el caso de material juvenil, este es muy reactivo y, de acuerdo a Gómez *et al.* (2007), durante los primeros subcultivos se producen tallos de tamaño adecuado para el enraizamiento. No obstante ello, es ampliamente conocido que en procesos de cultivos de tejidos la elongación permite al tejido acondicionarse fisiológicamente para que cese la división celular y comience el alargamiento celular.

En *E. globulus*, cuando se inducen a enraizar microtallos arrosetados, estos se necrosan rápidamente (Calderón-Baltierra, 1994), además puede ocurrir la formación de raíces que no presentan una buena conexión vascular, lo cual impide el crecimiento y aclimatación posterior de las vitroplantas, lo que podría explicar los numerosos problemas que se presentan para *E. globulus* en esta etapa. Si bien es posible enraizar brotes adventicios transfiriendo directamente desde el medio de multiplicación al medio de enraizamiento, el mismo autor indica que no es aconsejable, ya que es esencial que las hojas presenten una pigmentación y morfología normal, para el restablecimiento de la termodinámica de la planta, después que se han inducido las raíces.

De lo expuesto anteriormente se desprende que la multiplicación *in vitro* de *E. globulus* es una etapa que no es de fácil manejo y control, su tendencia a producir tallos cortos en densas agrupaciones complica la producción de brotes adecuados para el enraizamiento y, además, incide en la baja tasa de multiplicación que caracteriza a esta especie, lo que en realidad es un problema para producir brotes elongados en el medio de multiplicación. Por esta razón, es difícil que un laboratorio de micropropagación pueda llevar a cabo un manejo a este nivel de detalle, sin incurrir en costos prohibitivos para la producción de plantas gran escala. Actualmente, la mayor parte de los laboratorios que producen plantas micropropagadas de esta especie lo hacen para abastecer de plantas madres a programas de propagación mediante enraizamiento de estacas.

Un enfoque que se ha desarrollado para reducir los altos costos asociados a esta etapa es la utilización de métodos de multiplicación en medio líquido, que permiten una automatización del proceso y de este modo reducir los costos de mano de obra, asociados a la manipulación del material. Uno de los métodos más difundidos es el sistema RITA® (*Recipient a Immersion Temporaire Automatique*), que fue desarrollado en Francia y que corresponde a los denominados Sistemas de Inmersión Temporal (SIT), los cuales a diferencia del cultivo en medio líquido presentan como principio básico la inmersión periódica de los explantes en el medio de cultivo, lo que permite el intercambio gaseoso dentro del recipiente, disminuyendo de esta manera los problemas de vitrificación y oxidación que se produce en los medios líquidos.

De acuerdo a Ziv (1995), algunos de los principales factores que afectan la producción de biomasa, además del tipo de bioreactor y el método de aireación, se relacionan con el pH, luz, temperatura y componentes de medio de cultivo, entre otros. En *E. globulus*, González (2011) estudió el efecto de la frecuencia y tiempo de inmersión, concentración de macronutrientes y sacarosa, además del efecto de la adición al medio nutritivo de BAP y PVP

(Polivinilpirrolidona), encontrando que la interacción del tiempo y frecuencia de inmersión y concentración de micronutrientes afecta la multiplicación e hiperhidratación de los microtallos: Los mejores resultados fueron obtenidos con un tiempo de inmersión de 2 min, frecuencia cada 12 h, concentración de macronutrientes al 50%, 43,8 mM de sacarosa, 2,2 μ M de BAP y 250 mg/L de PVP.

Indudablemente, los SIT tienen un enorme potencial para superar las limitaciones del cultivo en medio semi-sólido, sin embargo su aplicación comercial o a nivel operacional en *E. globulus* se encuentra supeditada a resolver serias limitaciones relacionadas con la calidad de los explantes, el aumento de la tasa de multiplicación y el enraizamiento en sistemas SIT.

Enraizamiento (Etapa III) y Aclimatación (Etapa IV)

La propagación vegetativa de muchas de las especies de *Eucalyptus* se encuentra limitada por la alta variabilidad de la capacidad de enraizamiento que exhiben los clones y el descenso del potencial de enraizamiento a medida que aumenta la edad de las plantas madres (Watt *et al.*, 2003).

Es ampliamente reconocida la baja aptitud para la clonación de las especies de *Eucalyptus* de climas templados como *E. globulus* y *E. nitens*, dada la recalcitrancia al enraizamiento que exhibe la mayoría de sus genotipos (Willyams *et al.*, 1992; Barbour y Butcher, 1995; Tibbits *et al.*, 1997). Por esta razón, el desarrollo de la silvicultura clonal en estas especies se ha basado en el *screening* extensivo de la aptitud rizogénica y la propagación operacional de aquellos clones que poseen un alto porcentaje de enraizamiento, usualmente sobre 70%, los cuales generalmente corresponden solo a un pequeño porcentaje de la población de producción (Wilson, 1992). Por lo tanto, muchas selecciones deben ser descartadas debido a la imposibilidad de alcanzar tasas de enraizamiento económicamente viables (Wilson, 1992). Desde el punto de vista genético, esto reduce la cantidad de genes disponibles para el desarrollo de los programas de mejora y por lo mismo las ganancias productivas posibles de obtener (McRae y Cotterill, 1997).

La importancia a nivel mundial de *E. globulus* ha determinado el desarrollo de una intensiva investigación para su propagación vegetativa y, aun cuando la mayor parte de los estudios se ha enfocado en el problema del enraizamiento, lo cierto es que aún no ha sido posible desarrollar una solución tecnológica que permita disminuir los niveles de recalcitrancia de esta especie, tanto en micropropagación como en el enraizamiento de estacas, permaneciendo elusivos hasta el día de hoy muchos de los factores que intervienen en el proceso.

La formación de raíces adventicias es un proceso complejo que depende de múltiples factores, incluyendo fitohormonas, luz, estado nutricional, compuestos fenólicos e información genética de los explantes (Hand, 1994).

Se ha estudiado que el enraizamiento consta de dos fases fisiológicas sucesivas, pero interdependientes entre sí y con diferentes requerimientos; inducción, la cual corresponde a aquellos eventos moleculares y bioquímicos, que ocurren en forma previa a cualquier cambio morfológico; y formación o expresión de raíces, que comprende la división de las células del meristema radicular y el establecimiento del primordio radicular, seguido por la elongación y emergencia de la raíz (De Klerk *et al.*, 1999; Fett-Neto *et al.*, 2001; De Klerk, 2002)

Es bien conocido que las auxinas tienen un rol central en la determinación de la capacidad de enraizamiento. En un estudio llevado a cabo en *E. globulus* por Martellet y Fett-Neto (2005) se realizó un análisis comparativo de diferentes tipos de auxinas, intensidades de luz, presencia o ausencia del meristema apical, diferentes concentraciones de compuestos fenólicos y la acción de un inhibidor del etileno.

Los resultados mostraron que la auxina AIB era la más favorable para el enraizamiento y que una intensidad luminosa elevada durante la fase de expresión de raíces, promueve la respuesta al enraizamiento, en la presencia de auxina exógena.

También se encontró que la ausencia de ápices meristemáticos y la aplicación de fenoles no limitan el enraizamiento inducido por auxinas exógenas, además el etileno parece jugar un rol menor en el desarrollo de raíces adventicias, indicando finalmente que la respuesta rizogénica de esta especie resulta del efecto directo de las auxinas.

Bennett *et al.* (1994), al emplear un método convencional, obtuvieron tasas de enraizamiento que variaban entre 12 a 95%, en un grupo de cinco clones de material adulto de *E. globulus*, el método consideró el uso de un medio nutritivo de baja concentración salina, adicionado con 10 μM de IBA, y la mantención de los cultivos durante los primeros siete días en oscuridad, para luego exponerlos a un fotoperíodo normal, previo cultivo de los microtallos en un medio que contenía kinetina.

Un estudio posterior, determinó que la remoción del nitrato de amonio (NH_4NO_3) aumentaba la capacidad rizogénica de ciertos clones y que a nivel general realzaba el vigor y sobrevivencia de las vitroplantas, efecto que se debía a una menor variación del pH que se producía en el medio de baja concentración salina (Bennett *et al.*, 2004).

Un método ampliamente utilizado en *E. globulus* es el denominado método de enraizamiento sucesivo, el cual se lleva a cabo en dos etapas consecutivas; en la primera fase, de inducción de raíces, se emplea un medio de baja concentración salina adicionado con dosis altas de AIB (14,76 - 49,20 μM), durante un período que puede extenderse desde 1 a 4 días, en tanto que en la etapa de expresión de raíces se utiliza el mismo medio, pero sin hormonas, y al cual generalmente se le complementa carbón activo y, en algunos estudios, se ha reemplazado el nitrato de amonio por nitrato de calcio.

Los cultivos son mantenidos en oscuridad durante la fase de inducción y bajo un fotoperíodo de 16 horas luz, durante la fase de expresión de raíces (Ortiz y Koch, 2010; Martellet y Fett-Neto, 2005).

Las tasas de enraizamiento reportadas varían desde 0-100% en material juvenil, dependiendo del clon y del tratamiento ensayado; y sobre 60% en clones de material adulto que presentan buena aptitud para el enraizamiento.

El método, se basa en los estudios de modelamiento del proceso de rizogénesis adventicia, inducida por la aplicación de auxina exógena (De Klerk *et al.*, 1999; De Klerk, 2002). En la Figura N° 4, se muestran algunos explantes enraizados mediante este método.



Figura N° 4
EXPLANTES ENRAIZADOS DE *E. globulus*, MEDIANTE EL MÉTODO DE ENRAIZAMIENTO SUCESIVO

También se ha utilizado, un tercer método basado en el mismo principio, llamado de inducción rápida, que consiste en sumergir la base del microtallo en dosis elevadas de AIB (0,49-19,68 mM) durante 5 segundos a 30 minutos, para luego colocar los microtallos en un medio libre de hormonas, que puede ser similar al utilizado en la etapa de expresión de raíces del método anterior. Posteriormente los cultivos son mantenidos durante 4 días en oscuridad y luego bajo un fotoperíodo normal (Trindade y Pais, 1997). Luego de la aplicación de AIB los microtallos, también pueden ser transferidos directamente a una cámara de enraizamiento, donde se les proporciona condiciones ambientales parecidas a las utilizadas en macropropagación o enraizamiento de estacas (González, 2011). Trindade y Pais (1997) reportan tasas de enraizamiento de 16-95% en material adulto dependiendo del clon y del tratamiento ensayado y González (2011) de 4,4-60%, en clones de reconocida capacidad de enraizamiento.

Schwambach *et al.* (2005) determinaron que en *E. globulus* la nutrición mineral influenciaba significativamente tanto el número de raíces como su longitud, mientras que la formación y rapidez de emergencia de las raíces parecía estar determinada por la disponibilidad de auxina. El número de raíces es influenciado por la concentración de calcio, fuente de nitrógeno y zinc, mientras que la longitud de las raíces es afectada por la concentración de fósforo, hierro, manganeso y por la fuente de nitrógeno. Además, los explantes que fueron enraizados en la solución mineral optimizada tuvieron tasas de supervivencia superiores a los enraizados en el medio basal de control. Trindade y Pais (1997) encontraron que la habilidad de enraizamiento se incrementaba en un 10% cuando se eliminaba el boro del medio enraizamiento, lo cual se relacionó con la capacidad de este elemento de regular los niveles de auxina endógena durante el desarrollo de la raíz.

Los mismos autores, tal como se señaló anteriormente, indicaron que el período de rejuvenecimiento de material adulto, mediante subcultivo *in vitro*, necesario para obtener buenas tasas de enraizamiento varía de clon a clon, requiriéndose desde 8 meses a más de 1 año, para obtener brotes de buena calidad. Similar efecto se observó en la concentración de auxina y tiempo de exposición a la auxina, los cuales fueron altamente dependientes del clon, por esta razón no fue posible establecer un protocolo de enraizamiento adecuado para todos los clones, concluyéndose que para cada nuevo clon, podría ser necesario adaptar las condiciones de enraizamiento.

Al igual que en muchos *Eucalyptus*, en esta especie es común la formación de raíces en las hojas que quedan en contacto con el medio de cultivo, la excesiva formación de callo en la base de la microestaquilla y la necrosis del ápice y del tallo principal. Para prevenir la generación de raíces cuando las hojas se encuentran en contacto con la auxina es necesario

cortar las hojas de la parte baja de la microestaquilla, antes de su inserción en el medio de enraizamiento (Boulay, 1983; Ortiz y Koch, 2010), operación que demanda una mayor cantidad de tiempo para completar el proceso. La excesiva formación de callo, puede ser manejada a través de la reducción de la concentración de sacarosa, concentración salina del medio de cultivo y auxina, aunque el problema siempre estará presente. Respecto de la necrosis del eje principal, se señala al período de oscuridad inicial durante el enraizamiento como causante del fenómeno; una alternativa que se ha utilizado con éxito relativo es la sustitución del agar por sustratos como turba y perlita (Boulay, 1983), no obstante se ha determinado que la ausencia del ápice apical no tiene influencia sobre el enraizamiento de esta especie (Martellet y Fett-Neto, 2005) y además el tallo puede volver a crecer en el medio de expresión de raíces u otro medio que posea una alta concentración de sacarosa y carbón activo en su formulación (Ortiz y Koch, 2010), aun cuando esto implica un período de tiempo más extenso para que la vitroplanta se encuentre apta para el proceso de aclimatación.

Un aspecto que no ha sido debidamente considerado, pero que últimamente ha cobrado relevancia, tanto en *E. globulus* (Ruedell *et al.*, 2013) como en otras especies de *Eucalyptus* (Nakhooda *et al.*, 2011), es el efecto que tiene sobre el enraizamiento la composición del medio nutritivo y las condiciones ambientales previas al enraizamiento. En efecto, Bennet *et al.* (1994) tempranamente observaron que los resultados de enraizamiento mejoraban al alternar las citoquininas BAP y Kinetina durante la multiplicación. De igual forma, Trindade y Pais (1997) encontraron que la adición de los compuestos riboflavina y cloruro de colina (*choline chloride*) al medio de multiplicación, durante 1 a 2 meses previo al enraizamiento, aumentaba en 20% la tasa general de enraizamiento.

Por su parte, Ruedell *et al.*, (2013), determinaron que microtallos obtenidos de cultivos mantenidos previamente en un medio nutritivo desprovisto de sacarosa y bajo condiciones de luz roja lejana mostraban altos porcentajes de enraizamiento, incluso en la ausencia de auxina exógena en el medio de enraizamiento, lo cual se asoció a un aumento de los azúcares solubles y contenido de azúcar en la base del microtallo, cuando se proporcionaba luz roja lejana a los cultivos. Esto demostraba la importancia de una composición adecuada de carbohidratos en los cultivos donantes de explantes para el enraizamiento adventicio y generaba nuevas perspectivas para el entendimiento y solución del problema de recalcitrancia clonal, al enraizamiento de *E. globulus*.

Desde el punto de vista genético, un estudio efectuado por Ruaud *et al.* (1999) determinó que el enraizamiento *in vitro* se encuentra bajo control genético de tipo aditivo, siendo posible identificar y seleccionar a progenitores genéticamente superiores en su capacidad de enraizamiento, por medio de pruebas sencillas, bien replicadas (*screening* de enraizamiento); lo cual puede utilizarse para el desarrollo de líneas familiares y para el mejoramiento genético de la capacidad de enraizamiento.

Por lo mismo, en el área de la ingeniería genética es posible identificar genes involucrados en el proceso de enraizamiento, lo cual ha generado enormes expectativas, previéndose que los mayores avances para resolver el problema de recalcitrancia de *E. globulus*, surjan de esta área de la ciencia. Los últimos avances en la materia se relacionan con la identificación de genes de referencia para estudios de expresión en el enraizamiento adventicio de la especie (De Almeida *et al.*, 2010) y la evaluación de los perfiles de expresión de los transportadores AUX1 y PIN1, durante la formación de raíces usando la técnica de qPCR, encontrándose que PIN1 probablemente toma parte en el proceso de concentración de la auxina requerida para

programar las células involucradas en el establecimiento de nuevos meristemos radiculares (Fett-Neto *et al.*, 2011).

En otro aspecto, la aclimatación de vitroplantas es un paso crucial en la determinación de la producción total de plantas. En esta etapa intervienen varios factores, incluyendo el tipo de explantes, genotipo, duración del período de cultivo, localización geográfica, infraestructura y habilidades del personal (Watt *et al.*, 2003). Todos estos factores afectan el costo de las plantas micropropagadas, el cual se considera que es muy alto en relación a las plantas producidas por estaquillado (Wilson, 1996 y 1998b).

El mismo autor determinó que para ambas técnicas no existían diferencias significativas en la producción de plantas, en períodos similares de cultivo (30 plantas plantables en 54,9 y 56,9 semanas, respectivamente), por lo que concluyó que la micropropagación no incrementaba el rendimiento en la producción de plantas, debido principalmente a la elevada pérdida de plántulas durante la aclimatación, la cual probablemente era ocasionada por la mayor fragilidad de las vitroplantas.

Uno de los cuestionamientos que frecuentemente se hace a los estudios de micropropagación de *Eucalyptus* en general es la poca rigurosidad prestada en la evaluación de esta etapa, limitándose en muchos a casos a declarar que se “obtuvo una alta sobrevivencia de las vitroplantas cuando fueron transferida a invernadero”, lo cual dificulta evaluar la efectividad real de las técnicas desarrolladas (Watt *et al.*, 2003).

Sin duda y aunque no siempre resulta evidente, la aclimatación es una etapa crítica en el proceso de micropropagación. Las metodologías desarrolladas se basan en el principio de reducir gradualmente la humedad alrededor de las plantas y alterar su metabolismo desde una dependencia parcial (heterótrofa) a una completa independencia del suministro externo de carbohidratos (autótrofa).

Para especies de *Eucalyptus* resistentes al frío, Boulay (1983) describió un procedimiento de aclimatación que contempla la transferencia de explantes enraizados de 30 a 50 mm de altura a contenedores MELFERT. Dependiendo de la estación, las plantas permanecían durante 10 días en primavera-verano y 30 días en invierno en los contenedores cubiertos con film de polietileno. Cuando las raíces eran visibles a los costados del contenedor, el film de polietileno se removía progresivamente y luego las plantas eran transferidas a invernadero, para su viverización. El porcentaje de éxito alcanzado, fluctuó entre 30 a 100%, dependiendo del clon y de la estación del año en que fue realizada la aclimatación.

Específicamente para *E. globulus*, Trindade y Pais (1997) desarrollaron una metodología que considera el trasplante de las plantas enraizadas a un sustrato compuesto por turba y arena en una relación 50:50, manteniéndolas durante dos días bajo 85 a 90% de humedad relativa, antes de su transferencia a invernadero.

El sustrato fue adicionado con un fertilizante de lenta entrega (Osmocote 11:22:9) en una dosis de 5 g/L y además se aplicó el fungicida Previcure (1 mg/L) un día previo a la aclimatación, y cuando las plantas presentaban un tamaño de 8-10 cm de altura podían ser viverizadas en forma normal. En este estudio se alcanzó un 90-95% de plantas aclimatadas y luego de 3-4 semanas las raíces eran visibles en la base del contenedor.

Alternativamente, Ortiz y Koch (2010) describieron un procedimiento basado en el uso de hidrocultivos (Fira y Clapa, 2009), el cual contempla la transferencia de las plantas enraizadas a un medio líquido dispuesto en un contenedor abierto (Figura N° 5), en el cual las hojas se mantienen humectadas por la evaporación que se produce dentro del contenedor.

Las plantas fueron mantenidas durante cuatro semanas en una sala climatizada y posteriormente se trasladaron a un mini-invernadero, donde se las trasplantó a contenedores cuyo sustrato estaba compuesto por turba y perlita en una relación 1:1. En esta estructura inicialmente se proporcionó una alta humedad relativa, la que fue reducida paulatinamente hasta lograr la adaptación de las vitroplantas a un ambiente normal, y el proceso se extendía por un período de dos semanas, aproximadamente.

Durante la permanencia de las plantas en hidrocultivos, se observó un desarrollo vigoroso de las raíces, elongación del tallo y formación de nuevas hojas. Con este procedimiento se obtuvo un 100% de supervivencia cuando las plantas presentaban raíces largas y ramificadas al momento del trasplante, como las mostradas en la Figura N° 5; sin embargo, cuando las raíces mostraban algún tipo de problema, principalmente de conexión vascular, la sección basal del tallo se descomponía rápidamente, provocando la muerte de la planta, lo mismo sucedía cuando las plantas enraizadas se transferían directamente al mini-invernadero, sin pasar por la etapa de aclimatación en hidrocultivos.



Vitroplanta cuando se inicia el proceso (izq.). Sistema radicular de una planta cuando finaliza el período de hidrocultivo y es transferida a invernadero (Der.)

Figura N° 5 **ACLIMATACIÓN DE VITROPLANTAS DE *E. globulus* MEDIANTE HIDROCULTIVOS**

González (2011), utilizando un método de enraizamiento de inducción rápida, estudió el efecto del incremento de luz y suplemento de CO₂ sobre variables morfológicas de las vitroplantas de *E. globulus* durante la fase de aclimatación, la que fue realizada en una cámara de enraizamiento y aclimatación. Los resultados indican que la luz y el CO₂ aumentan significativamente el enraizamiento y que el incremento gradual de la intensidad lumínica aumenta el contenido de ceras epicuticulares y de almidón en las hojas. La interacción de ambos factores intensifica la acumulación de carbohidratos solubles y clorofila total. Además, el CO₂ aumenta la razón peso seco/peso fresco (%) y disminuye el porcentaje de callo.

De acuerdo a Franclet y Boulay (1982) las plantas generadas mediante micropropagación presentan una apariencia similar a plántulas normales en etapa de viverización, igualmente el sistema radicular consta de una raíz principal delgada, formada directamente de la base del tallo y que es distinta a la formada en estaquillas, ya que en estas generalmente presentan más de dos raíces del mismo tamaño, originadas en la parte lateral y sobre la base del tallo. No obstante, estas diferencias morfológicas parecen no incidir en la conductividad hidráulica, es decir ambos tipos de raíces son igualmente eficientes en el transporte de agua hacia el tallo (Watt *et al.*, 2003).

En general se menciona para otras especies de *Eucalyptus* que las plantas derivadas del cultivo de tejidos son muy uniformes y que, en términos de crecimiento en campo, inicialmente crecen más rápido que las plantas originadas de estaquillas (dependiendo del genotipo), pero que transcurrido el tiempo esta diferencia llega a ser no significativa (Rockwood y Warrag, 1994; Yang *et al.*, 1995; Watt *et al.*, 1995).

EMBRIOGÉNESIS SOMÁTICA EN *E. globulus*

La embriogénesis somática en *Eucalyptus* tiene el potencial de producir un gran número de plantas genéticamente idénticas con costos reducidos. Se ha determinado que *Eucalyptus globulus* es una especie altamente recalcitrante a este proceso (Pinto *et al.*, 2010) y, aunque actualmente existe un protocolo para la regeneración de plantas (Pinto *et al.*, 2002), el mismo autor reconoce que las bajas tasas de inducción y germinación de embriones somáticos supeditan su utilización práctica a una optimización de las técnicas desarrolladas.

La embriogénesis somática es un proceso mediante el cual se forman embriones somáticos o embriodes siguiendo las fases globular, corazón, torpedo y cotiledonar del embrión cigótico (formación de semillas) sin fecundación (Pierik, 1990; Ahuja, 1983).

La formación de embriones somáticos comienza con la desdiferenciación de las células del explante, para luego iniciar las divisiones mitóticas que conducirán a la generación de nuevos embriones (Pierik, 1990). Al igual que la organogénesis somática, el proceso se divide en etapas; en el caso de las Angiospermas se reconocen las etapas de Inducción, Iniciación, Proliferación de Cultivos, Maduración, Germinación y Formación de Plántulas. Cada una de ellas, se encuentra asociada a ciertas fases del desarrollo de los embriones somáticos. La etapa de Inducción corresponde a la transición de células somáticas a células capaces de generar embriones; en la etapa de Iniciación comienza la formación de embriones propiamente tal, la cual se identifica por el Estado Globular que adquieren los proembriones; la etapa de Proliferación se caracteriza por la presencia de Estados de Corazón (inicial) y Torpedo (fase más avanzada); en la etapa de Maduración se forman los embriones cotiledonares y finalmente en la etapa de Germinación se produce la germinación de los embriones somáticos y la formación posterior de la plántula. (Margara, 1988; Pierik, 1990; Rodríguez *et al.*, 1998). Las etapas anteriores, también se las suele agrupar en dos fases principales; Inducción, que es donde los tejidos adquieren competencia embriogénica (Inducción e Iniciación) y Expresión, que es donde las células competentes se desarrollan en embriones somáticos (Proliferación, Maduración y Germinación) (Merkle *et al.*, 1995).

La inducción de embriogénesis somática en *E. globulus*, fue descrita por primera vez en el estudio desarrollado por Trindade (1996); más tarde Nugent *et al.* (2001) reportaron la formación de todos los estados de desarrollo, aunque con tasas muy bajas de éxito que

no permitían su repetición, además de la formación de embriones anormales (cotiledones fusionados). Pinto *et al.* (2002), mediante el uso de embriones cigóticos maduros, lograron la inducción y la conversión de embriones somáticos a plántulas, con un 21% de éxito. Actualmente, constituye la única metodología donde se ha desarrollado el proceso completo de embriogénesis somática, no obstante y como ya fue mencionado, la baja tasa de inducción y germinación de los embriones, supedita su aplicación práctica a una optimización del protocolo desarrollado. También se ha reportado la formación de callo embriogénico, a partir de explantes de hojas cultivadas en un medio de inducción suplementado con IBA. En el último tiempo la investigación ha sido enfocada en el estudio de los factores que influyen en el proceso y en el desarrollo de la embriogénesis somática secundaria.

La etapa de inducción es influenciada tanto por factores inherentes al material vegetal como por factores físicos y químicos. Entre los primeros se identifican la edad, el genotipo y las condiciones sanitarias y fisiológicas del material, y entre los segundos el medio de cultivo, luz, temperatura, pH y reguladores del crecimiento u hormonas vegetales (Merkle, 1995; Thorpe, 2000; Phillips, 2004). La interacción entre estos factores conduce a la inducción y expresión de un modo específico de diferenciación y desarrollo celular (Gaj, 2004).

Se ha determinado que en *E. globulus* el callo embriogénico se produce mayormente en cotiledones de embriones cigóticos (Gómez, 2004; Pinto *et al.*, 2002). En el protocolo desarrollado por Pinto *et al.*, (2002), la embriogénesis somática es inducida por la presencia de la auxina ANA (3-15 mg/L) o por una combinación de ANA (1 mg/L) y 2,4 D (1 mg/L); sin embargo, se observó que la exposición de los cultivos a las concentraciones más altas de ANA, por más de una semana, inhibe la embriogénesis somática. Por otro lado, el aumento de la concentración de sacarosa reduce la producción de callo e incrementa la oxidación, además el uso de manitol inhibe la formación de callo embriogénico.

Los medios nutritivos de mejores resultados corresponden al medio MS, seguido del medio B5 (Gamborg *et al.*, 1968), tanto para la etapa de inducción como la de regeneración de embriones. En general el medio MS fue el medio de cultivo de mejor resultado en la etapa de expresión, independientemente del medio usado previamente en la etapa de inducción (Pinto *et al.*, 2008a). En el mismo estudio se determinó que el uso de antioxidantes en el medio de expresión reduce el potencial embriogénico y, si bien durante la inducción la acumulación de compuestos fenólicos es menor, se produce el mismo efecto observado en la etapa de expresión. La exposición prolongada de los cultivos a estos agentes inhibe completamente la respuesta embriogénica, lo cual hace replantear la influencia de la producción y acumulación de fenoles sobre el proceso de embriogénesis somática.

Un seguimiento de los cambios histocitológicos y la fluctuación de reservas de azúcares, lípidos y proteínas durante la embriogénesis somática reveló que las reservas acumuladas en embriones somáticos cotiledonares diferían de las contenidas en embriones cigóticos, lo cual sugiere que el manejo externo de esta variable podría incrementar la tasa de conversión de embriones somáticos a plántulas (Pinto *et al.*, 2010), dado el rol crucial que juegan estas sustancias durante la germinación de embriones (Canhoto *et al.*, 1996).

Por otro lado, las plantas derivadas de embriogénesis somática presentan un mayor riesgo de ocurrencia de mutaciones genéticas y/o formación de quimeras (Altman y Loberant, 1998), lo cual induce la formación de un nuevo genotipo, distinto al original. Por esta razón, es relevante disponer de un método rápido y eficiente que permita evaluar

fácilmente la estabilidad genética del material generado. Pinto *et al.* (2004), con el fin de detectar la ocurrencia de cambios en el contenido de ADN y ploidía en el material propagado, usaron citometría de flujo para medir el contenido de ADN nuclear de embriones somáticos, embriones cigóticos y hojas, y los resultados obtenidos establecieron que la metodología de embriogénesis somática utilizada (Pinto *et al.*, 2002) no induce cambios a nivel genético, por lo tanto se conservaba la fidelidad clonal del material propagado. Los resultados fueron corroborados, a través del uso de microsátélites por Loureiro *et al.* (2004).

Desde el punto de vista genético, se ha determinado que el porcentaje de éxito en la inducción de embriogénesis somática varía entre familias y año de producción de semillas evaluado (Pinto *et al.*, 2008 b). Los resultados del estudio indican que la inducción de embriogénesis somática se encuentra bajo control genético, en un 21,96% debido a la aptitud combinatoria general (ACG) y un 6,46% debido a efectos maternos, lo cual implica que la inducción de embriogénesis somática podría ser mejorada a través de la selección de genotipos originados de cruzamientos controlados. Además, en el contexto de programas de mejoramiento genético, la dirección de los cruzamientos controlados influye sobre los resultados de inducción de la embriogénesis somática.

Una alternativa, para superar algunas de las principales limitantes del protocolo desarrollado por Pinto *et al.* (2002), especialmente la baja tasa de inducción y germinación de embriones, es la implementación de una metodología de embriogénesis somática secundaria o recurrente, la cual es un proceso mediante el cual nuevos embriones somáticos son generados a partir de embriones somáticos en cultivo (Raemakers *et al.*, 1995, Merlke, 1995).

En varias especies vegetales se ha encontrado que la embriogénesis somática secundaria es mucho más eficiente que la primaria (Raemakers *et al.*, 1995, Akula *et al.*, 2000, Vasic *et al.*, 2001, Nair y Gupta, 2006), además los cultivos pueden retener su competencia embriogénica por un largo período de tiempo (Martinelli *et al.*, 2001). En general, los callos embriogénicos son mantenidos en un medio nutritivo similar al usado en la etapa de inducción, siendo preferido el medio líquido para la propagación a gran escala (Von Arnold *et al.*, 2002).

Un estudio llevado a cabo por Pinto *et al.* (2008c) evaluó el efecto de la composición del medio de cultivo, reguladores del crecimiento y luz sobre la embriogénesis somática secundaria. Los resultados indicaron que el medio MS sin reguladores de crecimiento fue el más eficiente para la formación y germinación de embriones, mientras que el medio de cultivo B5 obtuvo resultados satisfactorios solo en la etapa de proliferación de embriones somáticos globulares. La reducción de las concentraciones de la auxina ANA incrementó la proliferación de embriones somáticos globulares y permitió que la competencia embriogénica pudiera ser mantenida en un medio libre de reguladores del crecimiento. Las citoquininas BAP y Kinetina, aun cuando no mejoraron la proliferación de embriones globulares secundarios, resultaron ser críticas en las últimas etapas de la embriogénesis somática, particularmente durante la germinación, lo cual mejoraba sustancialmente el sistema de propagación de plantas.

Dependiendo de la etapa de la embriogénesis, se observó que la oscuridad estimula la mantención y proliferación de embriones globulares secundarios, condición que puede ser mantenida hasta alcanzar el estado cotiledonar, posteriormente es necesario exponer los cultivos a la luz. El protocolo de embriogénesis somática secundaria delineado fue mucho más eficiente que el reportado por Pinto *et al.* (2002), por lo tanto se concluyó que es factible incrementar el potencial de regeneración de *E. globulus*. La competencia embriogénica de los cultivos fue mantenida por al menos dos años.

Respecto de la aclimatación de plantas, Pinto *et. al.* (2011) desarrollaron un estudio en plantas generadas de embriones somáticos secundarios, las cuales luego de una fase de elongación fueron trasplantadas a contenedores cuyo sustrato estaba compuesto por turba y perlita. Las plantas se aclimataron en un Phytotron, mediante la reducción progresiva de la humedad relativa y el aumento de la intensidad de la luz. Las tasas de supervivencia obtenidas fueron menores a 50% después de una semana, por lo que aún es necesario mejorar el conocimiento actual de los cambios estructurales, histológicos y funcionales que se producen en las plantas durante el proceso de aclimatación, lo cual es fundamental para incrementar los rendimientos del actual sistema de producción de plantas.

Pinto (2007) indica que, a pesar de los notables avances logrados en el entendimiento de la embriogénesis somática, el conocimiento del proceso es aún muy vago en relación a los mecanismos involucrados en su regulación, por lo tanto es necesario continuar investigando, con el fin de optimizar las diferentes etapas que comprende la embriogénesis somática y desarrollar un sistema eficiente de producción de plantas, que pueda ser utilizado en forma industrial.

El mismo autor, sugiere que la investigación debiera orientarse a mejorar genéticamente la capacidad embriogénica, lo cual abre la posibilidad de integrar la embriogénesis somática a programas de mejoramiento genético, a optimizar y asegurar la replicabilidad del proceso de embriogénesis somática secundaria, especialmente en la etapa expresión, y a evaluar en condiciones de campo la productividad y fisiología de las plantas originadas de embriogénesis somática.

CONCLUSIONES

Si bien hoy existen protocolos que permiten la micropropagación de *E. globulus*, la utilización de la técnica de organogénesis somática se encuentra supeditada a la propagación de aquellos genotipos que presentan altos porcentajes de enraizamiento. De igual forma, los mayores costos por unidad de planta hacen que actualmente esta técnica solo sea utilizada comercialmente en la producción de plantas madres para programas de estaquillado.

En el caso de la embriogénesis somática, las limitaciones impuestas por las bajas tasas de conversión a plantas hacen que la técnica hoy no tenga aplicación práctica.

La producción masiva de plantas a gran escala continúa siendo un desafío científico y tecnológico, que no pocas veces ha desanimado a los investigadores y fuentes de financiamiento, al no poder hacer realidad las ventajas que ofrece esta potente herramienta biotecnológica, en el rápido mundo actual.

En el corto plazo no se prevén avances significativos en la materia, pero con seguridad y con investigación sustentada en el mediano y largo plazo se develarán muchos de los misterios que hoy en día oculta esta extraordinaria especie, haciendo posible superar su recalcitrancia y de esta manera utilizar los mejores ejemplares, lo cual constituye una de las últimas fronteras para aumentar y mantener la productividad de los sitios forestales en el futuro.

REFERENCIAS

Ahuja M. 1983. Micropropagation à la carte. In: Micropropagation of woody plants, Forestry Science. V.41. Ahuja M.R. (Ed). Kluwer Academic Publishers. Pp.: 3-9.

Alfenas A.C., da Silva Guimarães L.M., Graça R.N., Alfenas R.F., Zaperlo T.G., Rosado C.C.G., Zauza E.A.V., Mafia R.G. and M.M. Coutinho. 2011. Minimizing disease risks in Eucalyptus plantations. In: Joining silvicultural and genetic strategies to minimize Eucalyptus environmental stresses: from research to practice. Proc. of IUFRO Conf., Porto Seguro, Bahia State, Brazil. 14-18 November 2011. Pp.: 51–53.

Altman A. 2003. From plant tissue culture to biotechnology: scientific revolutions, abiotic stress tolerance, and forestry. In *Vitro Cell Dev Biol - Plant* 39: 75 – 84.

Altman A. and B. Loberant. 1998. Micropropagation: Clonal plant propagation In Vitro. In: *Agricultural Biotechnology*. A. Altman (Ed.). Marcel Dekker, Inc. Madison, U.S.A. Pp.: 19-42.

Altman A. and P.M. Hasegawa. 2012. *Plant Biotechnology and Agriculture, Prospects for the 21st Century*. Academic Press, 1st Edition. 624 p.

Akula A., Becker D. and M. Bateson. 2000. High-yielding repetitive somatic embryogenesis and plant recovery in a selected tea clone, 'TRI-2025', by temporary immersion. *Plant Cell Rep* 19:1140–1145.

Assis T. F., Fett-Neto A. G. and A. C. Alferas. 2004. Current techniques and prospects for the clonal propagation of hardwoods with emphasis on *Eucalyptus*. In: *Proceedings of Plantation Forest Biotechnology for the 21st century*. Fort P. O.; Carson M. and C. Walter (Eds.). Research Signpost 37/661 (2), Kerala, India. Pp.: 303-333.

Barbour E. L. and T. Butcher. 1995. Field testing vegetative propagation techniques of *Eucalyptus globulus*. In: *Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality*. Potts, B. M. et al. (Eds.): Proc. CRC-IUFRO Conf., Hobart 19 to 24 Feb. CRC for Temperate Hardwood Forestry, Hobart, Australia. Pp.: 313-314.

Becwar M.R., Wann S.R., Johnson M.A., Verhagen S.A., Feirer R.P. and R. Nagmani. 1988. Development and characterization of *in vitro* embryogenic systems in conifers. In: Ahuja MA, ed. *Somatic cell genetics of woody plants*. KJuw Academic Publishers, 1-18.

Bennett I., McComb J., Tonkin C. y D. McDavid. 1994. Alternating cytokinins in multiplication media stimulates *in vitro* shoot growth and rooting of *Eucalyptus globulus* Labill. *Annals of Botany* 74:53-58.

Bennett I. J., Mc David D. and J.A. Mc Comb. 2004. The influence of Ammonium nitrate, pH and indole butyric acid on root induction and survival in soil of micropropagated *Eucalyptus globulus*. *Biologia Plantarum*. 47 (3):355-360.

Blakesley D., Allen A., Pellny T.K., and A.V. Roberts. 2002. Natural and induced polyploidy in *Acacia dealbata* Link and *Acacia mangium* Wild. *Ann. Bot.* 90: 391–398.

Bonga J. M. y D. J. Durzan. 1982. *Tissue culture in Forestry*. Martinus Nijhoff, Dr. W. Junk Publishers, The Hague. The Netherlands.

Borrvalho N. 2011. Are-appraisal of *Eucalyptus* plantations from the point of view of its quality-cost competitiveness and how to move them to the next level. Joining silvicultural and genetic strategies to minimize Eucalyptus environmental stresses: from research to practice. Proc. of IUFRO Conf., Porto Seguro, Bahia State, Brazil. 14-18 November 2011.

Burdon R. D. and J. Aimers-Halliday. 2006. Managing risk in clonal forestry. *CAB reviews: Perspectives in agriculture, Veterinary Science. Nutr Nat Resour* 1(35).

Boulay M. 1983. Micropropagation of frost resistant *Eucalyptus*. In: *Proc. Workshop of Eucalyptus*. California Sacramento USDA Forest Service General Tech Rep PSW 69, Sacramento. Pp.:102-107.

Calderón-Baltierra X. 1994. Influencia del calcio y ácido giberélico en el alargamiento de brotes adventicios in vitro de *Eucalyptus globulus*. *Bosque* 15 (1): 33-38.

Campbell M.M., Brunner A.M., Jones H.M. and S.H. Strauss. 2003. Forestry's Fertile Crescent: the application of biotechnology to forest trees. *Plant Biotechnology Journal*, 1: 141–154.

Canhoto J.M., Mesquita J.F. and G.S. Cruz. 1996. Ultrastructural changes in cotyledons of Pineapple Guava (Myrtaceae) during somatic embryogenesis. *Ann Bot* 78:513- 521.

Carpineti L. 2005. Importancia de la silvicultura clonal. INTA, Buenos Aires, Argentina. IDIA XXI N° 8. Pp.: 153-156.

De Almeida M.R., Ruedell C.M., Ricachenevsky F.K., Sperotto R.A., Pasquali G., and A.G. Fett-Neto. 2010. Reference gene selection for quantitative reverse transcription-polymerase chain reaction normalization during in vitro adventitious rooting in *Eucalyptus globulus* Labill. BMC Mol Biol 11: 73 doi: 10.1186/1471-2199-11-73.

De Fossard A., Broker P. and R. Bourne. 1977. The organ culture of nodes of four species de *Eucalyptus*. Acta Hort. 78: 157-165.

De Klerk G., Van Der Krieken W. and J. De Jong. 1999. Adventitious roots: New concepts, new possibilities. *In vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 35: 189-199.

De Klerk G. 2002. Rooting of microcuttings: theory and practice. *In vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*. 38:415–422.

Debergh, P.C. and L.J. Maene. 1981. A scheme for commercial propagation of ornamental plants by tissue culture. *Scientia Horticulturae* 14: 335-345.

Durand-Cresswell R., Boulay M. and A. Franclet. 1982. Vegetative propagation of *Eucalyptus*. In: Tissue culture in forestry. Bonga J. and D. Dursan (Eds.). Martinus Nijhoff, The Hague, 99: 150-181.

Fenning T.M. and J. Gershenzon. 2002. 'Where will the wood come from? Plantation forests and the role of biotechnology', Trends in Biotechnology, Vol. 20, No. 7. Pp.: 291-296.

Fett-Neto A.G., Fett P.S., Goulart L.W.V., Pasquali G., Termignoni R.R. and A.G. Ferreira. 2001. Distinct effect of auxin and light on adventitious root development in *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiol*. 21: 457-464.

Fett-Neto A. G., De Almeida M. and C. Ruedell. 2011. Expression of auxin carrier genes during adventitious rooting in *Eucalyptus globulus*. BMC Proceedings 2011, 5 (Suppl 7):P64 doi:10.1186/1753-6561-5-S7-P64

Fira A. y D. Clapa. 2009. A protocol for *Ex vitro* acclimation in hidroculture in liquid substrate. <http://docs.google.com>.

Franclet A. and M. Boulay. 1982. Micropropagation of frost resistant eucalypt clones. *Aust. For. Res.* 13: 83-89.

Franclet A., Boulay M., Bekkai F., Fouret Y., Verschoore-Martouzet B. and W. Walker. 1987. Rejuvenation. En: Cell and Tissue Culture in Forestry. Vol I. General Principles and Biotechnology. Bonga J. M. y D.J. Durzan (Eds.). Martinus Nijhoff Publ., Dordrecht. Pp.: 232-248.

Gaj M.D. 2004. Factors influencing somatic embryogenesis induction and plant regeneration with particular reference to *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Plant Growth Regulat.* 43:27-47.

Gamborg O.L., Miller R.A. and K. Ojima. 1968. Nutrient requirements of suspension cultures of soybean root cells. *Exp Cell Res* 50:151–158.

George E.F. and P.C. Debergh. 2008. Micropropagation: Uses and Methods. In: Plant Propagation by Tissue Culture. Volume 1, The Background. 3rd Edition. George E., Hall M. and G. De Klerk (Eds). Published by Springer, Dordrecht, The Netherlands. Pp.: 29-31.

Giri C.C., Shyamkumar B. and C. Anjaneyulu. 2004. Progress in Tissue culture, genetic transformation and applications of biotechnology to trees: an overview. *Trees* 18:115–135.

Griffin A.R. 1996. Genetically-modified trees: the plantations of the future or an expensive distraction? *Commonwealth Forestry Review* Vol. 75:169-175.

Gómez C. 2004. Organogénesis e inducción de embryogenesis somática en *Eucalyptus globulus* Labill. Tesis Magíster en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 112 p.

Gómez C., Ríos D. y M. Sánchez-Olate. 2007. Efecto del subcultivo sucesivo sobre la caulogénesis adventicia de *Eucalyptus globulus*. *Bosque* 28(1): 13-17.

González R. 2011. Propagación *in vitro* por medio del sistema de inmersión temporal y aclimatación de microplantas de *Eucalyptus globulus* Labill. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. Concepción, Chile. 96 p.

Grewal S., Ahuja A. and C. Atal. 1980. *In vitro* proliferation of shoot apices of *Eucalyptus citriodora* Hook. Ind. J. Exp. Biol. 18:775-777.

Gutiérrez B., Molina M.P., Balocchi C. y F. Droppelmann. 2001. Desarrollo de una Raza Local de *Eucalyptus globulus* Tolerante al Frío en Chile. En: Actas del Simposio IUFRO Internacional, Developing the Eucalypt of the Future. Valdivia, Chile. 10-15 septiembre de 2001.

Gutiérrez B. 2005. Propagación vegetativa y silvicultura clonal: Antecedentes generales. En: Clonación de raulí, estado actual y perspectivas. Editado por Braulio Gutiérrez, Oriana Ortiz y María Paz Molina. CEFOR, INFOR, UACH. Pp.: 19-40.

Hand P. 1994. Biochemical and molecular markers of cellular competence for adventitious rooting. In: Biology of Adventitious Root Formation, ed. by Davis T. D., Haissig B. E., Plenum Press, New York: 111–122.

Hartmann H.T., Kester D.E., Davies F.T. Jr. and R.L. Geneve. 2002. Hartmann and Kester's Plant Propagation: Principles and Practices, 7th edn. Prentice-Hall, Inc., EnglewoodCliffs, NJ, USA.

Hartney V. J. 1982. Vegetative propagation of *Eucalyptus in vitro* In: Colloque Intern. sur la Culture *in vitro* des Essences Forestières. Fontainebleau: IUFRO, AFOCEL; 1982:175–180.

Ikemori Y. 1987. Epicormic shoots from the branches of *Eucalyptus grandis* as an explant source for *in vitro* culture. Comm. For. Rev. 66: 351-355.

Jha T.B. and B. Ghosh. 2005. Plant Tissue Culture Basic And Applied, Universities Press New Delhi India. 206 p.

Kleinschmit J., Khunara D., Gerhold, H. y W. Libby. 1993. Past, Present and Anticipated Applications of Clonal Forestry. In: Clonal Forestry II. Conservation and Application. Ahuja, M. and W. Libby (Eds). Springer-Verlag. Berlin. Pp.: 9-41.

Le Roux J. and J. Van Staden. 1991. Micropropagation and tissue culture of *Eucalyptus* – a review. Tree Physiology 9: 435-477.

Libby W.J. 2000. Proc. 27th Meeting of the Canadian Tree Improvement Association. Genetic Resource Management: Building Strategies for the New Millennium. Part II: 6-19.

Libby W. J. and R. M. Rauter. 1984. Advantages of Clonal Forestry. The Forestry Chronicle. Volume 60 (3): 145-149.

Lindgren D. 2001. Advantages of clonal propagation. The Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Forest Genetics and Plant Physiology, SE 90183, Umeå, Sweden. 14 p.

Loureiro J., Lopes T., Pinto G., Santos R., Siva S., Santos C. 2004. Analysis of genetic stability of *Eucalyptus globulus* Labill. somatic embryos by Flow cytometry and microsatellites. In " *Eucalyptus* in a changing world" (Eds. NMG Borralho, JS Pereira, C Marques, J Coutinho, M Madeira, M Tomé) pg 529- 531. Proc. IUFRO Conf. Aveiro, 11- 15 Oct.

Margara J. 1988. Multiplicación Vegetativa y Cultivo *in vitro*. Ediciones Mundi Prensa. España. 225 p.

Martellet C. and A.G. Fett-Neto. 2005. Role of auxin and its modulators in the adventitious rooting of *Eucalyptus* species differing in recalcitrance. Plant Growth Regul 45:1–10.

- Martinelli L., Candioli E., Costa D. and V. Poletti. 2001.** Morphogenic competence of *Vitis rupestris* S. secondary somatic embryos with a long culture history. *Plant Cell Rep* 20:279–284.
- Mc Comb J. and I. Bennett. 1986.** *Eucalyptus* (*Eucalyptus* spp). In *Biotechnology in Agriculture and Forestry*, Volume 1: Trees 1. Y.P.S. Bajaj (Ed.). Springer-Verlag, Berlin. Pp.: 340-362.
- McCown B.H. 1986.** Woody ornamentals, shade trees, and conifers. In: *Tissue Culture as a Plant Production System for Horticultural Crops*. Edited by RH Zimmernan, RJ Griesbach, FA Hammerschlag and RH Lawson. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands. Pp.: 333–342.
- McCown D.D. and B.H. McCown. 1987.** North American hardwoods. In: Bonga JM, Durzan DJ, eds. *Cell and tissue culture in forestry*. Volume 3. Dordrecht: Martinus Nijhoff, 247-260.
- Mac Rae S. and P. Coterrill. 1997.** Macropropagation and Micropropagation of *E. Globulus*. Means of Capturing Genetic Gain. Proceedings of the IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of *Eucalyptus* v2: Biotechnology applied to genetic improvement of tree species. Salvador, Brazil, august 24 y 29. Pp.: 102-110.
- Merkle S.A. 1995.** Strategies for dealing with limitations of somatic embryogenesis in hardwood trees. *Plant Tiss Cult Biotechnol* 1:112-121.
- Moraes J., Stape J. and D. Grattapaglia. 2011.** Preface Proc. of IUFRO Conf: Joining silvicultural and genetic strategies to minimize Eucalyptus environmental stresses: from research to practice, Porto Seguro 11-15 November 2011.
- Murashige T. 1974.** Plant propagation through tissue culture. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 25: 135 - 166.
- Murashige T. and F. Skoog. 1962.** A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol Plant* 15: 473-97.
- Nair R.R. and S.D. Gupta. 2006.** High- frequency plant regeneration through cyclic secondary somatic embryogenesis in black pepper (*Piper nigrum* L.). *Plant Cell Rep* 24:600–707.
- Nakhooda M., Watt M. P. and D. Mycock D. 2011.** Auxin stability and accumulation during *in vitro* shoot morphogenesis influences subsequent root induction and development in *Eucalyptus grandis*. *Plant Growth Regulation*, 65: 263-271.
- Nugent G., Chhandler S.F., Whitemn P. and T. Stevenson. 2001.** Somatic embryogenesis in *Eucalyptus globulus*. *Plant Cell, Tiss Organ Clut* 67: 85-88.
- Oller J., Toribio M., Celestino C. y G. Toval. 2004.** The culture of elite adult trees in a genetic improvement programme through *Eucalyptus globulus* Labill., clonal micropropagation. *Eucalyptus in a Changing World*. Proc. of IUFRO Conf., Aveiro 11-15 October 2004.
- Ortiz O. y L. Koch. 2010.** Micropropagación de árboles superiores de *E. globulus*, seleccionados en zonas de estrés hídrico. Informe técnico, proyecto INNOVACHILE “Generación y Producción de plantas de *E. globulus* tolerantes a la sequía”, INFOR. 25 p.
- Palmberg-Lerche, C. y J.B. Ball. 1998.** El estado actual de las plantaciones forestales en América Latina y El Caribe y examen de las actividades relacionadas con el mejoramiento genético. En *Actas Primer Congreso Latinoamericano IUFRO: el manejo sustentable de los recursos forestales: desafío del siglo XXI*, 22 al 28 de noviembre de 1998, Valdivia, Chile.
- Pierik R. 1990.** Cultivo *in vitro* de plantas superiores. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 301 p.
- Pinto G., Santos C., Neves L. and C. Araújo. 2002 a.** Somatic embryogenesis and plant regeneration in *Eucalyptus globulus* Labill. *Plant Cell Rep.* 21:208–213.
- Pinto G., Loureiro J., Lopes T. and C.V. Santos. 2004.** Analysis of genetic stability of *Eucalyptus globulus* Labill. somatic embryos by flow cytometry. *Theor. Appl. Genet.* 109:580–587.

- Pinto G. 2007.** *Eucalyptus globulus* Plant Regeneration Via Somatic Embryogenesis. PhD Thesis. University of Aveiro. Aveiro. 203 p.
- Pinto G., Silva S., Araújo C., Neves L., Park Y-S. and C. Santos. 2008a.** Factors influencing somatic embryogenesis induction in *Eucalyptus globulus* Labill.: basal medium and anti-browning agents. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 95:79–88
- Pinto G., Park Y-S., Neves L., Araújo C. and C. Santos. 2008b.** Genetic control of somatic embryogenesis in *Eucalyptus globulus* Labill. *Plant Cell Rep.* 27:1093–1101.
- Pinto G., Park Y-S., Silva S., Araújo C., Neves L. and C. Santos. 2008c.** Factors affecting maintenance, proliferation, and germination of secondary somatic embryos of *Eucalyptus globulus* Labill. *Plant Cell Tissue Organ Cult* 95:69–79.
- Pinto G., Silva S., Araújo C., Neves L. and C. Santos. 2010.** Histocytological changes and reserves accumulation during somatic embryogenesis in *Eucalyptus globulus*. *Trees* 24:763–769.
- Pinto G., Silva S., Loureiro J., Costa A., Dias M., Araújo C., Neves L. and C. Santos C. 2011.** Acclimatization of secondary somatic embryos derived plants of *Eucalyptus globulus* Labill.: an ultrastructural approach. *Trees* 25:383–392.
- Phillips G. 2004.** *In vitro* morphogenesis in plants- recent advances. *In Vitro Cell Dev Biol Plant* 40:342-345.
- Potts B., Volker P. y H. Dungey. 1992.** Barriers to the production of hybrids in *Eucalyptus*. In: Mass Production for Genetically Improved Fast Growing Forest Tree Species. AFOCEL-IUFRO Symposium 1992. Bordeaux. Association Foret Cellulose. Nangis, France. Pp.: 193-204.
- Raemakers C.J.J.M., Jacobsen E. and R.G.F. Visser. 1995.** Secondary somatic embryogenesis and applications in plant breeding. *Euphytica* 81:93–107.
- Rai R. 2007.** Genetics and Plant Breeding Introduction to Plant Biotechnology Dr. Rhitu Rai Scientist National Research Centre on Plant Biotechnology Lal Bhadur Shastri Building Pusa Campus New Delhi-110012.
- Razdan M.K. 2003.** Introduction to Plant Tissue. 2 nd. Edition. Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd. New Delhi. 375 p.
- Roberds J. and J. Bishir. 1997.** Risk analyses in clonal forestry. *Can. J. For. Res.* 27: 425-432.
- Rodríguez R., Álvarez C., Centeno M., Berros B. and A. Rodríguez. 1998.** Embriogénesis somática y estrategias para superar las limitaciones en leñosas. En: primer Curso Internacional sobre Biotecnología Forestal. Fac. de Ciencias Forestales Universidad de Concepción.
- Rodríguez R., Fernández M., Pacheco J. y M.J. Cañal. 2005.** Envejecimiento vegetal, una barrera a la propagación, alternativas. En: Biotecnología vegetal en especies leñosas de interés forestal. Editado por Sánchez M. y D. Ríos. Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Concepción. Concepción, Chile. Pp.: 29-48.
- Rockwood D. L. and E.I. Warrag. 1994.** Field performance of micropropagated, macropropagated, and seed-derived propagules of three *Eucalyptus grandis* ortets. *Plant Cell Reports*, 13. 628-631.
- Ruad J.N., Lawrence N., Pepper S., Potts B.M. and N.M.G. Borralho. 1999.** Genetic variation of *in vitro* rooting ability with time in *Eucalyptus globulus*. *Silvae Genet.* 48:4–7.
- Ruedell C. M., De Almeida M. R., Schwambach J., Posenato C. and A. G. Fett-Neto. 2013.** Pre and post-severance effects of light quality on carbohydrate dynamics and microcutting adventitious rooting of two *Eucalyptus* species of contrasting recalcitrance. *Plant Growth Regul.* 69: 235–245.
- Sabja A. 1998.** Macro y micropropagación en especies forestales. En: Ipinza, R., B. Gutiérrez y V. Emhart (Eds.). Curso Mejora Genética Forestal Operativa. Apunte N° 1. 16 – 21 noviembre de 1998 Valdivia Chile. 219 –232.
- Sadhu M. K. 1989.** Plant propagation. New Age International (P) Ltd. New Delhi. 287 p.

- Satyanarayana, A. and D. Varghese. 2007.** Plant tissue culture practices and new experimental protocols, I.K. International Publishing House. Pp.: 85-86.
- Schwambach J., Fadanelli C. and A.G. Fett-Neto. 2005.** Mineral nutrition and adventitious rooting in microcuttings of *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiol* 25:487–494.
- Tibbitts W. N., White T. L., Hodge G. R. and K. R. Joyce.1997.** Genetic control of rooting of stem cuttings in *Eucalyptus nitens*. *Aust. J. Bot.* 45: 203–210 (1997).
- Thorpe T., Harry I. and P. Kumar. 1991.** Application of micropropagation to forestry. In: *Micropropagation: technology and application* Debergh P. and P. Zimmerman. (Eds.) Kluwer Academic Publisher. Pp.: 311-336.
- Thorpe T.A. 2000.** Somatic embryogenesis: morphogenesis, physiology, biochemistry and molecular biology. *Korean J Plant Tiss Cult* 27:245:258.
- Trindade H. 1996.** *Eucalyptus globulus* Labill: systems for in vitro regeneration. PhD Thesis. University of Lisbon, Lisbon.
- Trindade H. and M.S. Pais. 1997.** *In vitro* studies on *Eucalyptus globulus* rooting ability. *In Vitro Cell. Devel. Biol. Plant* 33:1–5.
- Trindade H., Ferreira J.G., Pais M.S. and R. Aloni. 1990.** The role of cytokinin and auxin in rapid multiplication of shoots of *Eucalyptus globulus* grown *in vitro*. *Australian Forestry* 53(3): 221-223.
- Tzfira T., Zuker A. and A. Altman. 1998.** Forest-tree biotechnology: genetic transformation and its application to future forests. *Trends in Biotechnology*, 1998, vol. 16, no. 19. Pp.: 439-446.
- Vasic D., Alibert G. and D. Skoric. 2001.** Protocol for efficient repetitive and secondary somatic embryogenesis in *Helianthus maximiliani* (Schrader). *Plant Cell Rep* 20:121–125.
- Videla P. y P. Chung. 1996.** Micropropagación de *Eucalyptus globulus* a través de segmentos nodales. *Ciencia e Investigación Forestal*. **10 (2): 165-173.**
- Von Arnold S., Sabala I., Bozhkovi P., Dyachok J. and L. Filanova. 2002.** Developmental pathways of somatic embryogenesis. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 69: 233-249.
- Villalobos, V. y T. Thorpe. 1991.** Micropropagación: conceptos, metodologías y resultados. En: *Cultivo de tejidos en la agricultura. Fundamentos y aplicaciones*. (Ed): Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia. Pp.: 128 - 141.
- Walter C. y M. Menzies. 2010.** Genetic Modification as a component of forest biotechnology. In: *Forest and genetically modified trees*. FAO, Rome. 240 p.
- Wang B. S. P., Charest P.J. and B. Downie. 1993.** *Ex situ* storage of seeds, pollen and *in vitro* cultures of perennial woody plant species. *Food & Agriculture Org.* 83 p.
- Watt M.P., Duncan M., Blakeway F.C., and B. Herman. 1995.** Field performance of micropropagated *Eucalyptus* hybrids. *South African Forestry Journal*. 173: 17- 21
- Watt M.P., Blakeway F.C., Mokotedi M.E.O y S.M. Jain. 2003.** Micropropagation of *Eucalyptus*. In: *Micropropagation of Woody Trees and Fruits*. S.M Jain and K. Ishii (eds). Kluwer Academic, Netherlands. Pp.: 217-244.
- White P.R. 1943.** A handbook of plant tissue culture. Lancaster: Cattell.
- Wilson P.J. 1992.** Inter- and intra-family variation in rooting capacity in micropropagated *Eucalyptus globules* and *Eucalyptus nitens*. In: *Mass Production Technology for Genetically Improved Fast Growing Forest Tree Species* (AFOCEL-IUFRO Symposium 1992). Vol. II. Pp.: 177-181.

Wilson P. J. 1996. Multiplication rates in vitro and by stem cutting propagation, and clonal development from *Eucalyptus globulus* seedlings. *Forest Science* 42: 415-418.

Wilson P. J. 1998 a. The discipline of forest tree propagation. *Southern African Forestry Journal*. 183: 47-52.

Wilson P. J. 1998 b. *In vitro in vacuo*. *Southern African Forestry Journal*. 183: 53-58.

Willyams D., Whiteman P., Cameron J. and S.F Chandler. 1992. Inter- and intra-family variation in rooting capacity in micropropagated *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. In: *Mass Production Technology for Genetically Improved Fast Growing Forest Tree Species (AFOCEL-IUFRO Symposium 1992)*. Association Forêt Cellulose, Nangis, France. Vol. II, Pp.: 177–181.

Wingfield M.J., Roux J., Slippers B., Hurley B., Garnas J. and B. Wingfield. 2011. Well established as well as new technologies provide options to reduce increasing insect pest and pathogen damage to eucalypt plantations. In: *Joining silvicultural and genetic strategies to minimize Eucalyptus environmental stresses: from research to practice. Proc..of IUFRO Conf., Porto Seguro, Bahia State, Brazil. 14-18 November 2011.* Pp.: 49–50.

Yang J., Chung J. and Z.Chen. 1995. Vegetative propagation of adult *Eucalyptus grandis* x *urophylla* and comparison of growth between micropropagated plants and rooted cuttings. *Plant Cell Reports* 15: 170-173.

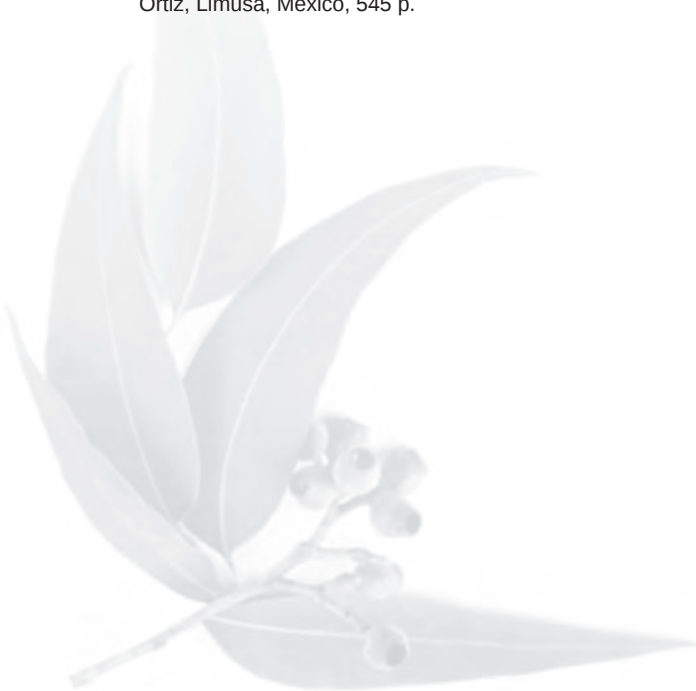
Yang J., Ho C., Chang S. and Z. Chen. 1996. Micropropagation of mature trees of *Eucalyptus camaldulensis* with fast-growing phenotype. *Taiwan Journal of Forest Science*. 1996. 11(4): 421-431.

Yasodha R., Sumanthi R. and K. Gurumuthi.1997. Micropropagation of difficult to propagates clones of eucalypts. In: *silviculture and Improvement of Eucalypts*, vol 2: *Biotechnology applied to genetic improvement of tree species*. Proceedings of the IUFRO conference, Salvador, Brazil. Pp.: 123-126.

Yasodha R., Sumanthi R. and K. Gurumurthi. 2001. Branch segments of mature eucalypts – as a source of explants for micropropagation. En *Actas: Simposio Internacional IUFRO: Desarrollando el Eucalipto del Futuro, Septiembre del 2001, Valdivia Chile*.

Ziv M. 1995. The control of bioreactor environment for plant propagation in liquid culture. *Acta Horticulturae*. 393:25-38.

Zobel B. y J. Talbert. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Trad. por Manuel Guzmán Ortiz, Limusa, México, 545 p.





10. BIOLOGÍA REPRODUCTIVA E HIBRIDACIÓN DE *Eucalyptus globulus*

Patricio Rojas V.¹

INTRODUCCIÓN

Los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus* en Chile datan de la década de los ochenta con la introducción de germoplasma silvestre desde Australia, que correspondió a colecciones efectuadas por CSIRO². Estas colectas de semillas fueron efectuadas en la distribución geográfica de las principales especies de zonas templadas en Australia y de interés comercial para Chile. Entre estas especies destacan *E. camaldulensis*, *E. delegatensis*, *E. globulus*, *E. nitens* y *E. viminalis*. En forma menos intensiva se introdujeron posteriormente algunas progenies y procedencias de *E. cladocalyx* y *E. sideroxylon* en la zona semiárida del país.

La selección de estas especies corresponde a un antiguo y extenso programa de introducción de especies y procedencias de INFOR que data de la década de los sesenta y cuyo principal objetivo fue evaluar la adaptación y crecimiento de diferentes especies en distintas condiciones edafoclimáticas de Chile.

Durante mucho tiempo *E. globulus* fue considerada como una maleza y una competencia en las plantaciones de *Pinus radiata*, pero en virtud de su adaptación, excelente crecimiento y características excepcionales de su fibra para la producción de celulosa comenzó su plantación extensiva a partir de la década de los ochenta hasta conformar un patrimonio que en 2011 era ya de 523.530 ha (INFOR, 2013). Sin embargo, la especie presenta limitaciones en cuanto a su tolerancia a la sequía y heladas, donde es sustituida por otras especies del género como *E. nitens* en zonas frías y en menor escala por *E. camaldulensis* en zonas de secano.

El conocimiento de la biología reproductiva de la especie objetivo de este capítulo es clave para diseñar las estrategias de mejoramiento genético de las especies del género *Eucalyptus*, en cuanto determina el sistema de propagación más adecuado del material genético mejorado a ser usado operativamente en las plantaciones industriales. De esto dependerá si el mejoramiento genético será desarrollado principalmente por propagación sexuada (semillas) o asexuada (clones). La propagación de material genético de *E. globulus* es viable por los dos sistemas, ya que es factible el enraizamiento de clones selectos y también lo es la producción de semillas a escala operacional por polinización abierta o controlada de los huertos semilleros.

De hecho la implementación del sistema de polinización controlada en una sola visita (OSP por su sigla en inglés) ha permitido la producción de semillas de polinización controlada en *E. globulus* a un costo, homogeneidad y calidad genética competitiva con la propagación clonal, constituyéndose en una opción válida de producción de plantas. En el caso de *E. nitens* en tanto, por sus limitaciones en la propagación vegetativa por estacas dadas por su bajo enraizamiento, la propagación es principalmente por semillas mejoradas genéticamente de los huertos.

1 Investigador Ingeniero Forestal MSc ESAQ/USP, Mg USACH. parojas@infor.cl

2 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. Australia

También el conocimiento de la biología reproductiva de la especie abre la posibilidad de generar híbridos intra o inter específicos, para mejorar la adaptación a sitios o las características productivas de las especies de mayor importancia comercial, como el caso por ejemplo de la tolerancia al frío o la sequía y la aptitud pulpable, respectivamente .

Además de lo anterior, es posible explotar la heterosis o vigor híbrido de las cruas. De esta forma, los híbridos potenciales para las zonas con heladas son *E. nitens* x *E. globulus*, *E. viminalis* x *E. globulus*, *E. gunnii* x *E. globulus*, y *E. camaldulensis* x *E. globulus*, *E. cladocalyx* x *E. globulus*, *E. nitens* x *E. camaldulensis* para las zonas de secano. Además de otras barreras de incompatibilidad genética, el tamaño de la yema floral y los órganos reproductivos asociados (estigma, estilo, ovario) determinan la factibilidad de efectuar cruzamientos artificiales exitosos.

A modo de ejemplo, *E. globulus* presenta una incompatibilidad unilateral con los cruzamientos con especies de flores pequeñas, debido a la imposibilidad de fecundación de sus óvulos, derivada del largo de su estilo (Shivanna *et al.*, 1997). El gran tamaño la yema floral de *E. globulus* (15 mm), facilita el trabajo de emasculación, polinización y aislación de las flores polinizadas. Esto también determina la factibilidad de la polinización operacional en los huertos semilleros, bajando los costos de flor polinizada en forma significativa y permitiendo la obtención de grandes cantidades de semillas de cruzamientos controlados a ser usados en los viveros.

BIOLOGÍA REPRODUCTIVA DE EUCALIPTOS

Los eucaliptos son naturalmente protándricos, que es presumiblemente una adaptación para sus exocruzas (Eldridge *et al.*, 1993). Sus yemas florales están cubiertas por un opérculo, derivado de la fusión de los pétalos y sépalos (*Eucalyptus*, del griego Eu = bien y Kalyptus = cubierto). La caída del opérculo en las flores maduras es seguida inmediatamente por el despliegue de los estambres con las anteras, mientras el estigma no llega a ser receptivo sino varios días después. El tiempo que transcurre desde la caída del opérculo hasta la máxima receptividad del estigma, varía entre especies siendo de 4-6 días en *E. grandis*, hasta 10-14 en *E. regnans*.

Las flores de los eucaliptos generalmente se presentan en inflorescencias que nacen en la axila de las hojas. Las yemas florales crecen en forma individual o en grupos impares de 3 o más unidades. Las yemas florales individuales se presentan en pocas especies, entre ellas en *E. globulus*.



(Fuente: <http://www.anbg.gov.au/cpbr/cd-keys/euclid3/euclidsample/html/learn.htm#hybrids>)

Figura N° 1
INFLORESCENCIAS DE EUCALIPTOS CON 1, 3, 7 Y MÁS YEMAS FLORALES.

El control de la floración está determinado por factores ambientales y componentes genéticos. Este aspecto es importante de conocer en las especies de *Eucalyptus*, por cuanto entrega información sobre el flujo génico en los huertos semilleros y resulta de utilidad para los trabajos de polinización artificial para la generación de híbridos F1 intra e interespecíficos.

La fenofase más crítica es la antesis, que corresponde a aquella en que se despliegan las anteras y estambres. En esta fase se produce la madurez y receptividad del estigma, y es el momento en que ocurre la polinización natural y se realiza la polinización artificial (Figura N° 2).

Existe una variación natural del periodo del año en que se produce la antesis en el rango geográfico natural de las especies de *Eucalyptus*, habiéndose encontrado diferencias de hasta 8 meses entre genotipos en ensayos genéticos de progenies de *E. globulus* (Potts y Gore, 1995). Se ha concluido por otra parte que el período de antesis está bajo fuerte control genético, existen variaciones importantes entre regiones geográficas de la especie, en las cuales las procedencias de Furneaux y Tasmania florecen más temprano y las de Otways más tarde. Un estudio desarrollado en el control genético de la floración en un año de *E. globulus* estimó una heredabilidad en sentido estricto de 0,65 (Potts y Gore, 1995) y una herencia intermedia en híbridos intraespecíficos inter raciales, lo cual concluyó sobre la importancia de los efectos genéticos aditivos.



(Fotos Patricio Rojas)

Figura N° 2
TRABAJO POLINIZACIÓN EN HUERTO SEMILLERO, FLORES EN ÁNTESIS DE *E. globulus* Y FLOR
EMASCULADA, POLINIZADA Y ETIQUETADA POR EL SISTEMA OSP

ANTECEDENTES DE TÉCNICAS DE HIBRIDACIÓN

Tres sistemas de polinización controlada han sido desarrollados en las últimas décadas en especies de *Eucalyptus* y aplicadas posteriormente en programas de mejoramiento genético para la propagación de material genético élite en plantaciones industriales (Van Wyk, 1977, Moncur, 1995; Harbard *et al.*, 1999, Assis *et al.*, 2005).

Sistema de Polinización en Tres Visitas (PTV)

La primera técnica es el método tradicional de las tres visitas, lo que consiste primero en emascular la yema floral, es decir cortar los estambres y las anteras (remover el aparato masculino de la flor), generalmente con tijeras o con bisturí, después polinizar el estigma cuando se encuentre receptivo y posteriormente remover la bolsa de aislación que evita la contaminación de polen foráneo. Este método es caro en relación a las actividades que hay que desarrollar en las labores de polinización, e inviable para cruzamientos operacionales en los huertos semilleros.

Sistema una Sola Visita (OSP)

El segundo sistema más efectivo en términos de costo y eficiencia operacional en cruzamientos controlados masivos efectuados en huertos semilleros corresponde al denominado Polinización en una sola etapa One Stop Pollination (OSP) (Harbard *et al.*, 1999) o una sola visita One Single Visit (OSV) (Williams *et al.*, 1999). El método considera la emasculación de la yema floral madura, o cercana a la fase de ántesis, el corte horizontal del estilo (Barbour y Spencer, 2000) usando un bisturí o tijera, y la aplicación del polen en la superficie del corte. También han sido probados otros tipos de corte, como el corte longitudinal del estilo, en especies con flores grandes como *E. globulus*. Los cortes horizontales han sido empleados en especies con flores pequeñas como *E. dunnii* (Barbour y Spencer, 2000). La posible contaminación de polen indeseable es impedida con tubos de plástico Tygon con diferentes diámetros interiores para calzar en el diámetro del estilo según el clon donde se efectúan las polinizaciones controladas. Generalmente este dispositivo es inocuo, no daña la flor y es removido naturalmente cuando se produce la caída del estilo como consecuencia de la fertilización de la flor.

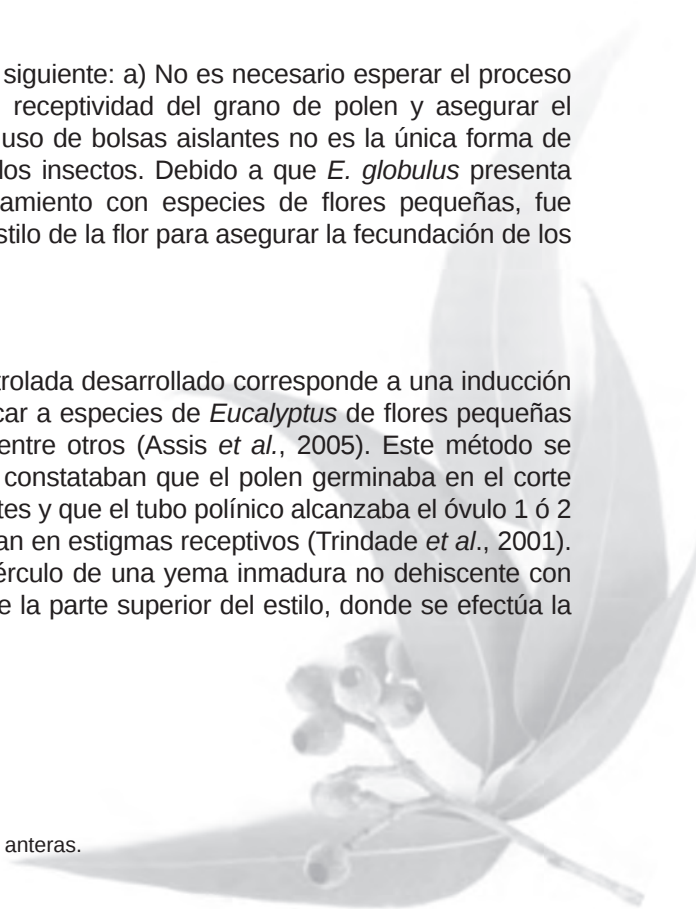
El sistema tradicionalmente usado en la polinización artificial era el de las tres visitas. El desarrollo de una nueva tecnología, iniciada en Chile y simultáneamente en Australia en la década de los noventa (Harbard *et al.*, 1999; Williams *et al.*, 1999), permitió reducir a una sola visita estas tres operaciones, reducir drásticamente los costos de las polinizaciones artificiales y permitir la producción de semillas híbridas (intraespecíficas) a gran escala. De esta forma las principales empresas forestales del país producen semillas de cruzamientos controlados *full sib* de los clones de mayor *ranking* genético de los huertos, constituyendo una alternativa a la plantación de clones.

La tecnología OSP se sustenta en lo siguiente: a) No es necesario esperar el proceso natural de maduración del estigma para su receptividad del grano de polen y asegurar el éxito de la fertilización de los óvulos y b) El uso de bolsas aislantes no es la única forma de proteger las flores de la contaminación por los insectos. Debido a que *E. globulus* presenta incompatibilidades unilaterales para el cruzamiento con especies de flores pequeñas, fue necesario efectuar diversos tratamientos al estilo de la flor para asegurar la fecundación de los óvulos de las especies receptoras.

Protopinia Artificial Inducida (PAI)

El tercer sistema de polinización controlada desarrollado corresponde a una inducción artificial de la protoginia³ que se puede aplicar a especies de *Eucalyptus* de flores pequeñas como *E. grandis*, *E. urophylla* y *E. saligna* entre otros (Assis *et al.*, 2005). Este método se desarrolló a partir de las observaciones que constataban que el polen germinaba en el corte del estilo de yemas inmaduras o no dehiscentes y que el tubo polínico alcanzaba el óvulo 1 ó 2 días más rápido que aquellos que germinaban en estigmas receptivos (Trindade *et al.*, 2001). El método se basa en cortar la punta de opérculo de una yema inmadura no dehiscente con bisturí o corta uñas de modo que se remueve la parte superior del estilo, donde se efectúa la polinización.

3 Protopinia :maduración de los estigmas antes que las anteras.



PROGRAMA DE HIBRIDACIÓN DE INFOR

La polinización controlada en *Eucalyptus* ha sido desarrollada por más de 5 décadas y constituye una herramienta fundamental en el mejoramiento genético de la especie.

En Chile la principal especie del género es *E. globulus* (*Blue Gum*), la que tiene una alta productividad en la zona centro sur, pero cuya distribución se ve limitada hacia el sur y precordillera por las heladas y el frío, mientras que hacia el norte lo es por la sequía. En el primer caso es sustituida por *E. nitens* (*Shinning Gum*), y en el segundo por *E. camaldulensis* (*River Red Gum*) o *E. cladocalyx* (*Sugar Gum*).

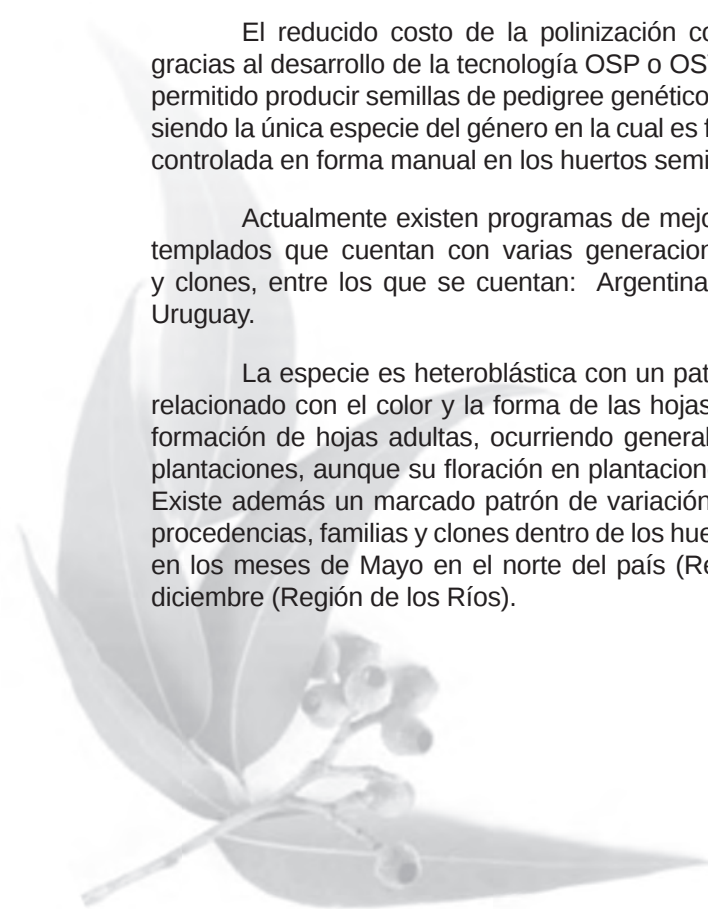
Eucalyptus globulus Labill es la principal especie en Chile para la producción de pulpa y papel a partir de fibra corta. Se distribuye naturalmente en el sudeste de Australia y es una de las *taxa* del complejo de la especie constituida además por *Eucalyptus bicostata*, *Eucalyptus maidenii* y *Eucalyptus pseudoglobulus*, que se diferencian básicamente por el número y el tamaño de las yemas florales por umbela y que en las clasificaciones más recientes son consideradas sub especies de *E. globulus*.

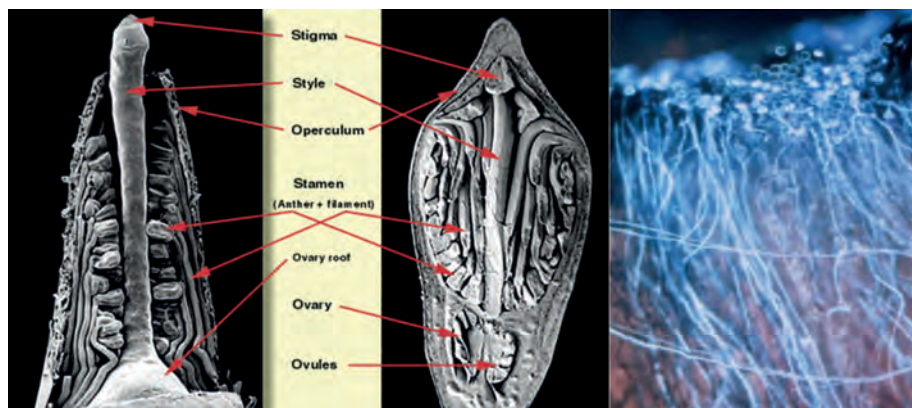
Genéticamente la especie está estratificada en 13 razas y 20 subrazas, en la cuales los estudios de marcadores moleculares han demostrado que existen tres líneas genéticas comprendiendo las principales poblaciones: a) Victoria, b) King Island y el Oeste de Tasmania y c) el Este de Tasmania y las islas Furneaux. Existen evidencias además que el acervo genético ha sido afectado por la hibridación inter específica a través de su historia evolutiva.

El reducido costo de la polinización controlada de la especie en los últimos años, gracias al desarrollo de la tecnología OSP o OSV (One Stop Pollination o One Single Visit), ha permitido producir semillas de pedigree genético conocido *full sib families* a escala operacional, siendo la única especie del género en la cual es factible la producción de semilla de polinización controlada en forma manual en los huertos semilleros.

Actualmente existen programas de mejoramiento genético en varios países de climas templados que cuentan con varias generaciones de selección y propagación por semillas y clones, entre los que se cuentan: Argentina, Australia, Chile, Etiopía, Portugal, España y Uruguay.

La especie es heteroblástica con un patrón diferenciado del desarrollo juvenil y adulto relacionado con el color y la forma de las hojas y el tallo. La madurez sexual coincide con la formación de hojas adultas, ocurriendo generalmente a la edad de 3 a 4 años de edad en plantaciones, aunque su floración en plantaciones operacionales más densas es más escasa. Existe además un marcado patrón de variación en la época de floración relacionada con las procedencias, familias y clones dentro de los huertos semilleros. La floración en Chile comienza en los meses de Mayo en el norte del país (Región de Coquimbo) y concluye en el mes de diciembre (Región de los Ríos).





(Foto: Cortesía Jaime Espejo)

Figura N° 3
ESTRUCTURA REPRODUCTIVA Y CRECIMIENTO DEL TUBO
POLÍNICO DEL POLEN APLICADO

Las flores de la especie son protándricas, hermafroditas, con una yema por umbela y de mayor tamaño (15 mm de diámetro) comparada con otras especies de yemas florales más pequeñas como *Eucalyptus nitens*, *E. grandis*, *E. gunnii*. La especie es polinizada en su hábitat natural por un loro (*Lathamus discolor*) que produce una alta tasa de fertilización de semillas, del orden del 70%, mientras que la abeja *Apis mellifera* y *Bombus terrestris* producen menos del 7%, esto porque la abeja es principalmente un consumidor de néctar, pero un polinizador ineficiente y que además deposita una alta proporción de polen endógamo.

Genéticamente entre 108 especies de *Eucalyptus* estudiadas, que presentan el número base de $2n = 22$, corresponde a una de las 13 especies del género con $2n = 24$ cromosomas que son destinadas a la producción de madera (Ruggeri, 1961 citado por Eldridge *et al*, 1993).

INFOR ha desarrollado programas de introducción de especies y de mejoramiento genético de las principales especies de *Eucalyptus* desde la década de los sesenta, a partir de los cuales se ha generado la necesidad de producir plantas híbridas de *E. globulus* para zonas frías y otras para zonas de secano. El programa de hibridación de *Eucalyptus* de INFOR tiene como objetivo generar semillas de cruzamientos interespecíficos por polinización artificial entre especies con algún potencial económico para las zonas semiáridas de Chile. La semilla de cruzamientos es probada en ensayos de progenies híbridas y también empleada como plantas madres para su propagación por estacas.

Para ello, INFOR ha seleccionado especies que han demostrado buena adaptación a zonas que presentan déficit hídrico y cuya madera presenta propiedades tecnológicas de interés comercial. Entre las especies potenciales para las zonas semiáridas se ha seleccionado especies bases y mejoradoras, de acuerdo a los resultados de ensayos de progenies/procedencias de INFOR, como:

***Eucalyptus camaldulensis*:** Especie de gran resistencia a climas semiáridos y de alta variabilidad genética en su distribución natural. La madera es de alto poder calorífico (4.800 Kcal/kg), pero su alta concentración de extraíbles y lignina dificulta su uso industrial para la producción de pulpa. La especie se propaga fácilmente por estacas y su hibridación artificial con otras especies también ha resultado exitosa. La especie

es muy afín con *Eucalyptus tereticornis* según su taxonomía. La mejor procedencia probada en Chile y otras latitudes de climas templados es Lake Albakutya, material sobre el que se ha concentrado los cruzamientos híbridos del programa.

***Eucalyptus sideroxylon*:** Especie que ha demostrado buenos resultados de adaptación a sitios con déficit hídrico, sin embargo la forma y el crecimiento evaluado en parcelas experimentales ha sido menor que otras especies forestales probadas en ambientes áridos. La corteza es rica en taninos y su madera es muy densa, llegando a valores cercanos a los 1.000 g/cm³.

***Eucalyptus cladocalyx*:** Constituye la especie de mayor potencial para la zona semiárida de Chile, debido a la forma, crecimiento de los árboles y propiedades tecnológicas de su madera. La especie, sin embargo, presenta incompatibilidades genéticas asociadas al número y forma de los cromosomas para el cruzamiento con otras especies del mismo género (Ruggeri, 1961; citado por Eldridge *et al.*, 1993).



(Fotos: Patricio Rojas)

Figura N° 4
FLORES EN ÁNTESIS *E. cladocalyx*, *E. camaldulensis* Y *E. diversicolor*.
HACIENDA EL TANGUE REGIÓN DE COQUIMBO

Entre las especies consideradas mejoradoras de las características de crecimiento y de las propiedades tecnológicas de la madera se encuentra *Eucalyptus globulus*, de gran adaptación en Chile en zonas con precipitación anual superior a los 500 mm y sin presencia de heladas. Esta especie es de gran importancia industrial debido a las excelentes propiedades de su madera para la producción de pulpa, aun cuando presenta incompatibilidades unilaterales para el cruzamiento con especies de flores pequeñas, por lo cual es necesario efectuar diversos tratamientos al estilo de la flor para asegurar la fecundación de los óvulos de las especies receptoras.

El objetivo de la estrategia de mejoramiento es generar semilla híbrida de *Eucalyptus* a través del sistema de polinización en una sola visita (OSP) (Harbard *et al.*, 1999), ya sea en flores de *E. globulus* o *E. camaldulensis* como madres. El objetivo de la hibridación en flores de *E. camaldulensis* es mejorar sus características de crecimiento y propiedades de la madera. La hibridación basada en *E. camaldulensis* es una estrategia válida para las zonas semiáridas, debe sin embargo notarse que las experiencias de híbridos F₁ (dependiendo de los genotipos usados como polen) pueden ser en algunos casos menos resistentes a la sequía que las especies puras, lo cual debe ser comprobado en los ensayos de progenies híbridas.

Algunas investigaciones realizadas en Australia señalan que la resistencia al estrés hídrico es intermedia entre los padres. Por ejemplo el híbrido F1 *E. camaldulensis* x *E. grandis* puede ser de mejor forma que *E. camaldulensis*, pero sucumbir a un *stress hídrico* más rápidamente. Según Bush (Comunicación personal, 2004), la estrategia más razonable es la propagación clonal o el cruzamiento controlado entre los mejores individuos de las mejores familias.

Según otros autores una forma de fijar características deseables en los genotipos híbridos es efectuar retrocruzamientos o *backcrossing*. De esta forma el polen colectado en las progenies híbridas es cruzado con el progenitor de mayor valor comercial, por ejemplo cruzar el polen híbrido *E. camaldulensis* x *E. globulus* sobre madres de *E. globulus* en una segunda generación (F2). El nivel de inversión económica en un programa de hibridación debe ser ponderado en función de los sitios potenciales de plantación.

VARIEDAD HÍBRIDA F1 *E. globulus* x *E. tereticornis* CLON 9251-4

Mediante Solicitud N° 810 del 13 de Diciembre de 2007 el Instituto Forestal registró como variedad protegida al clon híbrido 9251-4, resultante de una cruce de *Eucalyptus globulus* y *E. tereticornis*. Este individuo es una combinatoria artificial entre una especie de rápido crecimiento: *Eucalyptus globulus* con una especie tolerante a la sequía: *Eucalyptus tereticornis*. El híbrido fue generado por polinización controlada en el huerto semillero clonal Anilehue (Angol, Chile). La madre es el clon 7011 de *Eucalyptus globulus* con ranking genético conocido y el padre corresponde a una mezcla de polen de ocho individuos de la procedencia Devils Marsh (Australia) de *Eucalyptus tereticornis*.

El híbrido fue obtenido con el sistema de cruzamiento One Stop Pollination que consiste en emascular la flor de *Eucalyptus* en *ántesis*, inducir la receptividad del estigma con un corte en el mismo, polinizar y aislar la flor con Tygon ajustado al diámetro del estilo. El híbrido seleccionado presenta un fenotipo intermedio entre ambas especies parentales, con mayor semejanza al padre *E. tereticornis* ya que presenta hojas alternas y coriáceas, brotes axilares prominentes y coloración rojiza de brotes y tallo.



(Fotos: Patricio Rojas)

Figura N° 5
MORFOLOGÍA DEL HÍBRIDO F1 *E. globulus* x *E. tereticornis*
EN LA ETAPA DE VIVERO

COMENTARIOS

El conocimiento de la biología reproductiva de las especies de *Eucalyptus* ha permitido diseñar estrategias de mejoramiento genético en cuanto a los sistemas de propagación del material genético élite y también la factibilidad de generar híbridos inter e intraespecíficos con fines de mejora de adaptación, crecimiento o propiedades de la madera con fines comerciales.

En el caso de *E. globulus*, la implementación de la técnica de polinización en una visita OSP ha permitido la generación de matrices de cruzamiento con alto pedigrí genético en los huertos semilleros para la producción de semillas mejoradas a escala operacional. Esto ha sido posible por las características del tamaño de la flor de *E. globulus*, en cuanto a su facilidad de ser manipulada en polinizaciones artificiales.

Para incrementar el rendimiento de las polinizaciones las empresas han desarrollado instrumental como tijeras emasculadoras que permiten aumentar significativamente los rendimientos de flores polinizadas por operador. Las familias de polinización controlada por su calidad genética, homogeneidad y menor costo constituyen una opción a la propagación clonal de *E. globulus*.



(Fotos: Cortesía C. Balocchi)

Figura N° 6

TIJERAS EMASCULADORAS EMPLEADAS PARA LA POLINIZACIÓN OPERACIONAL

La hibridación interespecífica ha permitido por otra parte explorar la posibilidad de extender las plantaciones a sitios marginales de crecimiento para las especies de mayor importancia comercial como *E. globulus* y *E. nitens*. De esta forma, los híbridos potenciales para las zonas con heladas son *E. nitens* x *E. globulus*, *E. viminalis* x *E. globulus*, *E. gunnii* x *E. globulus*, en tanto que *E. camaldulensis* x *E. globulus*, *E. cladocalyx* x *E. globulus*, *E. nitens* x *E. camaldulensis* para las zonas de secano.

Los nuevos sistemas de polinización artificial desarrollados en las últimas dos décadas han permitido la producción de semillas híbridas tanto en especies con flores de tamaño grande como en aquellas con flores más pequeñas.

La comparación de las semillas viables obtenidas *versus* la efectividad de los sistemas de polinización indican que se obtuvo una menor retención de cápsulas en el sistema PTV que OSP y PAI (Assis *et al*, 2005).

La cantidad de semillas viables obtenidas en el sistema OSP y PAI fue mejor que el sistema PTV en los experimentos brasileros, mientras que los experimentos desarrollados en Australia muestran una leve superioridad del sistema PTV en relación a los otros.

REFERENCIAS

- Assis, T., Warburton, P. and Harwood, C., 2005.** Artificially induced protogyny: and advance in the controlled pollination of *Eucalyptus*. Australian Forestry 68(1): 26-32.
- Barbour, L. and Spencer, N., 2000.** The potential of a crossing technique for interspecific hybridization between *Eucalyptus globulus* and *E. dunnii*. . In Hybrid Breeding and Genetics of Forest Trees. Dungey,H.S., Dieters,M.J. and Nikles,D.G. (Compilers). pp 390-394. Proceedings of QFRI/CRC-SPF Symposium, 9-14 April 2000, Noosa, Queensland, Australia. (Department of Primary Industries, Brisbane).
- Eldridge, K., Davidson, J, Harwood, C, Van Wyk, 1993.** Eucalypt domestication and breeding. Clarendon Press, Oxford.
- Harbard, J.L., Griffin, A.R. and Espejo, J.E., 1999.** Mass controlled pollination of *Eucalyptus globulus*: a practical reality. Canadian Jnl of Forestry Research 29: 1457-1463.
- INFOR, 2013.** Anuario Forestal 2013. Boletín Estadístico N° 140. Instituto Forestal, Chile.
- Moncur, M.W., 1995.** Techniques for pollinating Eucalypts. ACIAR Technical reports No 34, Canberra.
- Potts, B. and Gore, P., 1995.** Reproductive biology and controlled pollination of *Eucalyptus* - a review. Publication of CRC, Sustainable production forestry, Australia.
- Shivanna, K.R., Cresti, M. and Ciampolini, F., 1997.** Pollen development and pollen-pistil interaction. In: Pollen biotechnology for crop production and improvement. K R Shivanna and V K Sawhney (Eds.). Cambridge University Press. pp 15-39.
- Trindade, H., Boavida, L.C., Borralho, N. and Feijó, J.A., 2001.** Successful fertilization and seed set from pollination on immature non-dehiscent flowers of *Eucalyptus globulus*. Annals of Botany 87, 469–475.
- Van Wyk, G., 1977.** Pollen handling, controlled pollination and grafting of *Eucalyptus grandis*. South African Forestry Journal 101, 47–53.
- Williams, D., Potts, B.M. and Black, P.G., 1999.** Testing single visit pollination procedures for *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*. Australian Forestry 62, 346–352.



11. MANEJO DE HUERTO SEMILLERO CLONAL DE *Eucalyptus nitens* CON BAJAS TENSIONES DE CRECIMIENTO RUCAMANQUI

Maria Paz Molina B.¹

Roberto Ipinza C.²

Verónica Emhart³

Oriana Ortiz N.⁴

INTRODUCCIÓN

Los huertos semilleros constituyen una de los principales mecanismos para materializar las ganancias genéticas que se obtienen como resultado del esfuerzo combinado de los programas de selección y mejoramiento. De acuerdo con las definiciones clásicas, ellos corresponden a una plantación de árboles genéticamente superiores, aislada de fuentes de polen de calidad inferior, intensamente manejadas para producir cosechas de semillas en forma frecuente, abundante y fácilmente recolectables.

Dentro de los huertos semilleros, los huertos semilleros clonales ofrecen algunas ventajas que aconsejan su utilización, resultando particularmente prácticos durante los inicios de los programas de mejoramiento. La ventaja más evidente se relaciona con la calidad del material que conforma el huerto. En este caso se trata de los mismos árboles seleccionados como *plus* los que conforman la población de producción y no sus hijos, como ocurre en el huerto de plantas, también conocido como de semillas.

Estos árboles *plus* se multiplican vegetativamente y cada copia se constituye en un rameto. La copia normalmente se realiza a través de la técnica de injertación, con lo cual se conserva la edad fisiológica del árbol original o *plus*, por lo tanto mantienen la madurez reproductiva y la capacidad de producir semillas, lo que tiene una gran importancia práctica.

En este capítulo se presentan las pautas generales para establecer un huerto semillero clonal y, en particular, uno de *Eucalyptus nitens* para la generación de semilla mejorada para plantaciones productoras de madera sólida de la especie que será utilizada por el Grupo ProNitens y Forestal Mininco SA, de acuerdo a un convenio de colaboración entre INFOR y ambas entidades.

Muchos de los aspectos que aquí son descritos corresponden a observaciones y a la experiencia de los autores en el tema de Mejoramiento Genético Forestal, que sin duda pueden ser coincidentes con otros profesionales especialistas, investigadores y forestadores.

CONSIDERACIONES Y MATERIALES PARA ESTABLECER EL HUERTO

Los rametos de *E. nitens* considerados en el huerto semillero Rucamanqui, en adelante HSC, corresponden a réplicas vegetativas, obtenidas mediante injertación, de individuos élite

1 Ingeniero Forestal Mg. Investigadora Sede Bio Bio Instituto Forestal mmolina@infor.cl

2 Ingeniero Forestal. Universidad de Chile, Dr. Ingeniero de Montes. Instituto Forestal. Chile. roberto.ipinza@infor.cl

3 CMPC Forestal Mininco SA. Veronica.Emhart@forestal.cmpc.cl

4 Ingeniero Forestal. oriana1.ortiz@gmail.com

identificados en ensayos de progenies, mediante una evaluación genética cuantitativa de sus caracteres de crecimiento y una posterior evaluación de contenido de lignina.

La individualización de cada árbol seleccionado para conformar el huerto semillero clonal se presenta en el Cuadro N° 1.

Cuadro N° 1
IDENTIFICACIÓN DE ÁRBOLES (CLONES) SELECCIONADOS QUE CONFORMARÁN
EL HUERTO SEMILLERO CLONAL DE *Eucalyptus nitens* PARA MADERA SÓLIDA

Clon (N°)	Predio	Plantación (Año)	Comuna	Estimación Lignina (%)
1000	Santa Teresa	1989	Vilcún	22,4
1001	Santa Teresa	1989	Vilcún	21,8
1002	San Antonio	2000	Nacimiento	21,7
1003	La Sombra	1993	Mulchén	21,8
1004	Rucamanqui	2001	Huepil	21,7
1005	Rucamanqui	2001	Huepil	21,8
1006	San Bernardo	2000	Nacimiento	21,7
1007	San Bernardo	2000	Nacimiento	22,6
1008	San Bernardo	2000	Nacimiento	22,0
1009	San Bernardo	2000	Nacimiento	22,1
1010	San Bernardo	2000	Nacimiento	22,0
1011	San Bernardo	2000	Nacimiento	22,0
1012	San Bernardo	2000	Nacimiento	22,3
1013	San Bernardo	2000	Nacimiento	21,7
1014	San Antonio	2000	Nacimiento	22,1
1015	Parc. 5 Sara Malleco	2000	Ercilla	22,0
1016	San Bernardo	2000	Nacimiento	22,1
1017	San Bernardo	2000	Nacimiento	21,8
1018	El Prado A y B	1993	Mulchén	21,7
1019	San Bernardo	2000	Nacimiento	21,7
1020	San Bernardo	2000	Nacimiento	22,3
1021	Santa Teresa	1989	Vilcún	21,8
1022	Santa Teresa	1989	Vilcún	21,6
1023	Santa Teresa	1989	Vilcún	22,5
1024	Santa Teresa	1989	Vilcún	21,8
1025	Santa Teresa	1989	Vilcún	21,6
1026	Santa Teresa	1989	Vilcún	22,3
1027	Santa Teresa	1989	Vilcún	22,0
1028	Santa Teresa	1989	Vilcún	22,4
1029	Santa Teresa	1989	Vilcún	22,3

El contenido de lignina es una característica medible en forma no destructiva y se estima que está relacionada con las menores tensiones de crecimiento (Bailleres *et al.*, 1995).

Sitio para Establecer un Huerto Semillero

Un aspecto fundamental para garantizar el éxito del HSC es la adecuada selección del lugar de establecimiento, el que debe asegurar una buena floración, desarrollo de las semillas y aislación de fuentes de polen contaminante. Entre otros aspectos la selección del sitio debe considerar también:

- Sitios favorables para la producción abundante y frecuente de semillas
- Establecer el HSC fuera del área de plantación de la especie, si esto permite mejorar la producción de semillas.
- Acceso adecuado para efectuar las labores de establecimiento, manejo y cosecha.
- Establecer los derechos legales para utilizar el terreno con los fines propuestos.
- Se deben reunir antecedentes respecto del uso futuro de los terrenos colindantes con el sitio del huerto, de modo de evitar que pueda verse rodeado por plantaciones de material no mejorado que actúe como fuente de contaminación del huerto.

En general el clima influye en la producción de semillas del huerto. En climas templados las flores tienden a emerger todas aproximadamente al mismo tiempo, lo cual favorece una polinización más efectiva. La escasez de precipitaciones disminuye la producción de flores, en caso que no se cuente con la posibilidad de riego frecuente. El viento puede causar daños que van desde la rotura de ramas y pérdida de flores, hasta la caída de los rametos, además, en las primeras etapas de establecidos los rametos se puede producir el efecto “vaso” que va provocando el desarraigamiento de las plantas (Figura N° 1). Sin embargo, este efecto se puede prevenir con la instalación de tutores en cada planta. Las heladas son otro factor que debe considerarse, si bien no deberían afectar la sobrevivencia de los rametos de *E. nitens*, si pueden afectar significativamente la floración.



Figura N° 1
EFECTO “VASO” PRODUCIDO POR EL VIENTO

En el sector donde se localizará el HSC, en este caso Hacienda Rucamanqui (Figura N° 2), el clima es templado mediterráneo (Clasificación Köppen), caracterizado por veranos cálidos y secos e inviernos fríos y lluviosos. La precipitación anual alcanza 1.200 mm aproximadamente, y las temperaturas medias anuales oscilan entre 14 y 15 °C.

El origen morfogenético de los suelos en la zona es similar al de otros del Valle Central de Chile, de la zona pre-andina y andina entre las Regiones de O'Higgins y Los Lagos, donde los suelos son de espesores variables, volcánicos residuales, de colores castaños, anaranjados y rojizos, con granulometrías en el rango de arenas limosas a limos arcillosos.

Los suelos son del tipo volcánico y han evolucionado *in situ* a partir de grandes volúmenes de ceniza eyectados durante la actividad volcánica explosiva ocurrida a partir del Cuaternario, en los últimos dos millones de años, desde numerosos centros eruptivos entre los cuales destacan los volcanes Quizapú, Descabezado Grande, Descabezado Chico y Antuco.

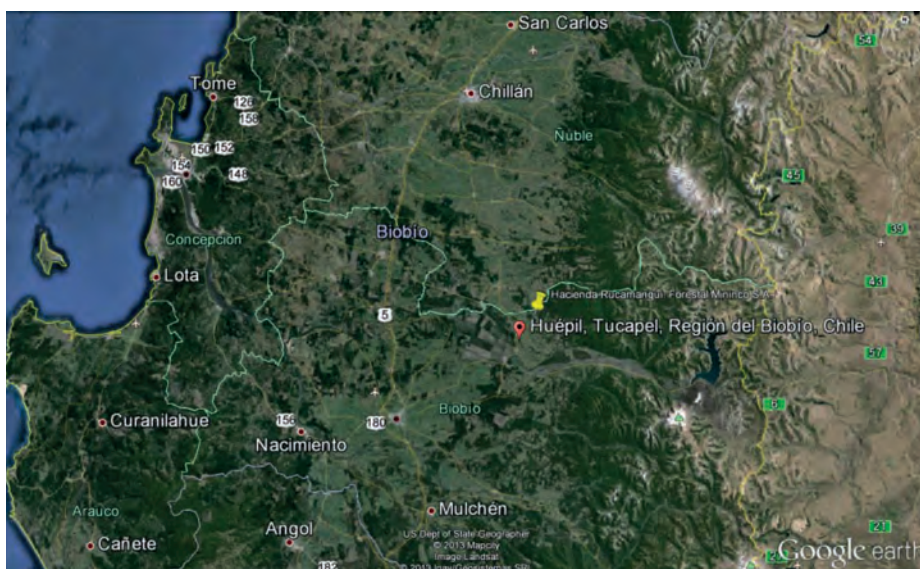


Figura N° 2
LOCALIZACIÓN HACIENDA RUCAMANQUI, SECTOR HUEPIL
COMUNA DE TUCAPEL, REGIÓN DEL BIO BIO

El suelo influye directamente en el crecimiento y la productividad de los rametos de un huerto. Se debe considerar sitios de características de suelo y clima moderados, ya que condiciones extremas provocan una disminución en la producción de semillas (Emhart, 1998). Suelos en extremo fértiles y condiciones climáticas muy favorables estimulan el crecimiento vegetativo más que la producción de órganos reproductivos, mientras que por el contrario, condiciones extremadamente adversas comprometen la supervivencia, crecimiento y vigor de las plantas.

Por su parte la salinidad del suelo inhibe totalmente la producción de flores de varias especies del género *Eucalyptus*. En el caso del HSC que se instalará en la Hacienda Rucamanqui un factor relevante es que la producción de flores y la actividad de los insectos

podrían ser más compatibles o sincronizadas, dada la altitud a que se encuentra este sitio (aproximadamente 400 msnm). Además, el lugar es aquel donde Forestal Mininco SA concentrará las operaciones de todos los huertos de *Eucalyptus nitens* en los próximos 15 años.

Diseño del Huerto

El huerto estará conformado por un total de 270 rametos provenientes de 28 clones, con una representación media de entre 9 y 10 rametos por clon. Estos se distribuirán en dos paños de plantación contiguos, uno de 16 filas por 16 columnas y otro menor de 4 filas por 6 columnas. La asignación de los rametos al terreno será al azar, pero considerando restricciones de distancia para evitar la cercanía entre rametos de un mismo clon.

El tamaño del huerto está en directa relación a la demanda de semilla mejorada que se requiere anualmente para el establecimiento de plantaciones de la empresa y de los miembros del Grupo ProNitens (ex PIT Nitens), tal como ha sido previamente establecido en un Convenio de colaboración suscrito por INFOR, Forestal Mininco SA y el Grupo ProNitens.

Preparación del Suelo

Es esencial llevar a cabo una buena preparación de sitio y una plantación adecuada del huerto semillero para lograr una buena producción de semillas. El objetivo más importante en la preparación del suelo es proveer las condiciones óptimas para el desarrollo vigoroso de la raíz del injerto (patrón+pua), para mejorar la penetración del agua y la capacidad de retención de humedad del suelo, además de reducir la competencia de las malezas, disminuir la incidencia de la incompatibilidad e inducir la producción de flores.

El sitio donde se establecerá el huerto fue preparado con *router* y rastra, y el efecto de esta preparación se prolonga por varios años luego de establecida la plantación. Este trabajo debe realizarse en períodos secos (verano) a una profundidad de 40 cm (Ipinza *et al.*, 1993).



Figura N° 3
SITIO SUBSOLADO PARA EL ESTABLECIMIENTO DEL HUERTO SEMILLERO CLONAL

Los suelos, aun ligeramente compactados, deberían ser subsolados en dos direcciones antes de establecer el huerto, plantando los árboles en las intersecciones (o a un lado del lomo, si existe el peligro de un drenaje insuficiente alrededor del árbol). La instalación del injerto en la intersección también permite que el desarrollo del sistema radicular sea más homogéneo en todas las direcciones, lo cual favorece una mejor resistencia frente al viento. Las especies del género *Eucalyptus* en general tienden a aumentar el desarrollo de raíces hacia los sectores menos compactados del sitio por lo cual una mala preparación del suelo puede provocar un sistema radicular desequilibrado, aspecto relevante dado al gran desarrollo de la parte aérea que en general presentan las distintas especies del género.

El subsolado también se utiliza para romper la compactación originada por el paso frecuente de equipo pesado o de ganado mayor una vez que el HSC se encuentra establecido por varias temporadas. Existen estudios que indican que el subsolado puede también aumentar la floración al mejorar las condiciones sanitarias del huerto y posiblemente, al inducir algo de estrés hídrico. Se debe buscar asesoría para realizar el subsolado, especialmente con relación a la frecuencia y a la distancia de los árboles. Cuando se realice, siempre debería colocarse un disco vertical adelante del subsolador, para cortar las raíces. De otra manera, las raíces largas pueden ser sacadas a la superficie.

Cabe recordar que la compactación del suelo adicionalmente impide que el agua penetre adecuadamente hacia las raíces lo que involucra mayores costos al aumentar la frecuencia de riegos, además del deterioro de los árboles o rametos en el caso del HSC.

La simple observación del estado externo del árbol, puede entregar una idea del estado real de este; muchos de los árboles sometidos a altos grados de compactación presentan una disminución considerable de hojas, raquitismo foliar, cuellos y raíces fácilmente observables y eventualmente pobres condiciones sanitarias (Chueca, 1997).

Otros indicadores de capas de suelo potencialmente compactadas, que pueden limitar el desarrollo de las raíces, son la resistencia determinada con el penetrómetro y la densidad aparente determinada en muestras de un volumen conocido de suelo no alterado. Para muchos cultivos existen tablas que relacionan los valores medidos y el grado de compactación del suelo. En el caso de las arboledas no existe demasiada información, pero si se ha detectado que solo en los primeros años presentan un crecimiento sostenido y luego este comienza a decaer notoriamente, lo que no ocurre en árboles donde el suelo no está compactado (Chueca, 1997)

Los suelos de la Hacienda Rucamanqui, donde será establecido el HSC, corresponden a suelos cuyo origen, como se señaló anteriormente, es ceniza volcánica, que destacan por su gran fertilidad y profundidad. El sitio seleccionado para el establecimiento del HSC corresponde un sector de topografía plana, donde se concentra la mayor parte de las unidades de producción de semilla mejorada de la empresa, las que se espera mantener por a lo menos 15 años de producción.

Dado el uso actual que tienen estos suelos, no será necesario realizar un análisis químico para determinar deficiencias nutricionales, labor que si es extremadamente relevante en forma habitual antes de establecer un HSC.

Por último, se debe considerar un control de malezas pre-plantación, posterior a la etapa de subsolado para dejar la cama de plantación completamente limpia. En general se utilizan controles de maleza químicos y en menor grado manuales.

Plantación de Rametos

Los rametos de cada clon deben ser plantados en hoyos o casillas de acuerdo al esquema que se diseñe para el HSC. El espaciamiento inicial en un huerto semillero debería ser suficientemente amplio para facilitar el pleno desarrollo de la copa por un período bastante largo, de modo de asegurar la producción y cosecha de semillas.

El espaciamiento depende de la especie, de la precocidad de floración, de la forma de la copa (sombra), de la depuración que se realice en el huerto semillero y de la maquinaria a utilizar en él. Normalmente, los rangos de espaciamiento van desde los 4 x 4 m hasta los 6 x 6 m. Ligado al proceso de plantación se efectúa la fertilización de los rametos, de acuerdo al análisis químico del suelo.

Dentro de los cuidados necesarios en la plantación de los rametos está asegurarse que la unión del injerto quede sobre el nivel del suelo. En muchos casos los injertos se establecen con un tamaño que va por sobre los 50 cm.

Dadas las características de la especie *E. nitens*, hojas de gran superficie y peso, es recomendable agregar un tutor a cada rameto de modo de evitar que la planta se doble y pueda producirse una quebradura en la zona del injerto (Figura N° 4). Esta consideración es muy importante en zonas más ventosas.



Figura N° 4
PLANTACIÓN DE RAMETO ZONA INJERTO SOBRE EL SUELO (IZQ)
PUNTO DE QUIEBRE EN LA ZONA DEL INJERTO (DER)

Monumentación

Es un trabajo indispensable para la identificación y adecuada toma de datos del material.

La identificación de los rametos de cada clon, tanto en terreno como en registros, permitirá mantener siempre un claro control sobre los antecedentes históricos que se haya acumulado a través del tiempo y dará la seguridad necesaria para la toma de decisiones (Ipinza *et al.*, 1994). Además, facilita enormemente la actividad de cruzamientos controlados y la cosecha familiar de la semilla cuando los huertos entran en producción.

Cualquiera sea el caso, se debe tener una ficha del huerto donde se contemplan todos los detalles de su instalación (fechas, labores, reposiciones, entre otros), diseño y croquis de terreno con puntos de referencia claros como norte, caminos, entrada, sentido de filas, límites entre las repeticiones o bloques e identificación de cada rameto presente en el huerto.

En general, estas fichas son auto-explicativas y permiten reconstruir la identificación en terreno si esta se perdiera. En el terreno mismo se puede marcar con letreros visibles cada rameto (Figura N° 5) o con marcas menos notorias junto al rameto y enterradas a ras de suelo. Adicionalmente, se marcan las filas y columnas del bloque y los vértices del huerto total.

Esto último es importante en la medida que el huerto esté protegido por hileras de aislación de otros árboles, que impiden el ingreso de polen indeseable si existieran árboles de la misma especie. Conocer el límite efectivo del huerto es necesario cuando se realizan cosechas al barrer de material seleccionado.



Figura N° 5
MARCACIÓN DE RAMETOS VISIBLE (IZQ) DE BAJA PERCEPCIÓN (DER)

Orientación de las Filas

Para orientar las filas se debe considerar algunos factores, como iluminación, dirección de los vientos dominantes y contorno de la plantación. De los tres, la iluminación es el más importante y lleva a orientar las filas en dirección norte-sur para el caso chileno y en general para el Hemisferio Sur, pues con ello se consigue una iluminación uniforme en ambos lados de los árboles. El viento puede afectar negativamente al HSC, en particular si se canaliza entre las filas, afectando a todos los individuos de la misma. Este inconveniente

puede evitarse con la instalación de cortavientos, pero aún así, una disposición de las filas en la dirección perpendicular de los vientos dominantes permite que las primeras filas protejan al resto del huerto (evitando al máximo sacrificar una buena iluminación). Siempre es deseable la máxima utilización del espacio, por el alto costo que involucra el terreno, siempre y cuando no sea en desmedro de los puntos anteriores (Ipinza, 1993).

PAUTA PARA EL MANEJO DEL HUERTO SEMILLERO CLONAL

Clave para el éxito es efectuar las labores de manejo del huerto semillero en el momento adecuado. Condición para un buen manejo en los inicios es el reconocimiento de los factores limitantes de la producción de semillas. El problema del manejo operacional del huerto semillero en los años posteriores se soluciona determinando los puntos óptimos para las acciones a seguir, como por ejemplo, cantidad de fertilizante a agregar al suelo o el número de árboles a ser raleados en el proceso de depuración (Balocchi y Delmastro, 1992).

Control de Maleza y Manejo de la Pradera

Se debe eliminar la vegetación indeseada que constituye la competencia con los rametos del huerto semillero.

El control de malezas puede realizarse a través de varios métodos; mecánico, químicos, biológicos, o una combinación de ellos. El método a utilizar depende de las condiciones propias del huerto y de consideraciones económicas, es decir lo que se esté dispuesto a gastar en este aspecto. Lo comúnmente aplicado como principio por las empresas forestales en sus huertos semilleros es que el pasto no sobrepase el talón de una persona (Ipinza *et al*, 1994).

El control de malezas en la tasa del rameto debe ser total, ya que optimiza la asimilación del fertilizante y otros químicos que se apliquen como por ejemplo alguna hormona para la inducción floral. En general el control de maleza del huerto será químico de acuerdo a los protocolos de aplicación de la empresa.

Fertilización

Normalmente, deficiencias nutricionales y compactación del suelo son las causas más comunes en la reducción de la producción de semillas dentro del huerto.

Dado el objetivo productivo que posee un huerto semillero, este es asimilable a la producción de árboles frutales o huertos frutales bajo la concepción agronómica. En estos últimos términos es que el manejo de los huertos semilleros se hace cada vez más intensivo y considerando las premisas descritas para huertos frutales. Las dosis, los elementos nutritivos y las épocas de aplicación están en función de factores tales como especie, clima, fertilidad del suelo y la propia fenología anual de la especie, entre otros.

En términos generales se debe considerar que durante los procesos de crecimiento vegetativo, el nitrógeno (N) constituye, entre todos los elementos requeridos por la planta, el más estrechamente asociado a esta fase, mientras que los elementos fósforo (P) y potasio (K), lo están con los procesos de floración y fructificación. Las exigencias de nutrientes para satisfacer los procesos fisiológicos (crecimiento vegetativo, floración y fructificación) varían

de acuerdo con la edad de la planta. Durante las primeras etapas, el desarrollo vegetativo tiene mayor importancia que el de fructificación o producción de frutos y, posteriormente, esta relación se iguala o invierte.

En las primeras etapas, el injerto requiere de un desarrollo vegetativo al igual que cualquier planta proveniente de semilla. En esta etapa, la planta o injerto fortalece la unión púa y patrón y crece desarrollando un volumen de copa que le permite generar un proceso fotosintético estable. En general esta etapa debería durar no más de 24 meses. Con posterioridad, comienza el periodo caracterizado por el inicio de la producción de frutos y un acentuado crecimiento de la planta. La duración de esta etapa se estima de 3 a 5 años y enseguida vendrá un periodo no determinado en que tendrá lugar la mayor producción de frutos y semillas, en forma sostenida temporada tras temporada, posiblemente hasta los 15 años para *E. nitens* a partir del cual es esperable que la producción comience a disminuir paulatinamente.

Aparte de la fertilización con nitrógeno inicial, se deben tomar muestras de suelo y foliares para realizar análisis químicos que detecten las deficiencias nutritivas y realizar posteriormente una fertilización correctiva con aquellos nutrientes que presenten deficiencias (Kirkman, 1994).

La aproximación a una dosis a aplicar para los distintos elementos puede determinarse a través de un análisis foliar, pero aún así es necesario efectuar estudios que determinen la época y dosis de fertilizantes más apropiadas. En general, la aplicación de fertilizantes para el crecimiento vegetativo debe realizarse al inicio de este periodo en el árbol, para optimizar su captación por parte de un sistema radicular que estará totalmente activo. Los fertilizantes requeridos para la floración en tanto, se recomienda aplicarlos en el momento inmediatamente anterior a la iniciación de las yemas sexuales o florales. Es muy común que estos periodos coincidan en los climas tipo mediterráneo donde crece *E. nitens*.

En general los suelos de Chile Central tienen deficiencias de Boro (B) importantes. En el caso particular del sitio donde se localizará el HSC (Hacienda Rucamanqui) se ha definido una deficiencia de leve a moderada, pero que es preciso controlar. El producto de mayor uso es la boro-natrocálita (11% B) y se aplican 30 g/planta al momento del establecimiento de las plantas.

La periodicidad de fertilización que se aplicará al huerto de Rucamanqui será de 2 veces al año, en conjunto con la aplicación de riego durante las 2 primeras temporadas.

Actualmente, el manejo de HSC está dirigiéndose al manejo semi-intensivo a través de las herramientas agronómicas existentes y utilizadas en la fruticultura.

Protección

Se debe contar con medidas de protección del huerto contra diferentes agentes de daño, como plagas y enfermedades, ganado, fuego y viento.

- Plagas y Enfermedades

En la zona donde estará establecido el huerto se han registrado ataques de *Gonipterus*

platipus, conocido como el gorgojo del eucalipto. Este insecto es originario del sudeste de Australia y se le encuentra en América del Sur (Chile, Argentina, Brasil y Uruguay), y en otros continentes como África y Europa. En Chile, actualmente y desde su entrada en 1998, se encuentra distribuido entre las Regiones de Valparaíso y La Araucanía (Alvarado y Sartori, 2006).

El gorgojo del eucalipto, tanto en estados larvales como en su estado adulto, se alimenta de las hojas, causando una intensa defoliación que reduce la tasa de crecimiento anual y el vigor del hospedero.

Forestal Mininco realiza aplicaciones químicas con insecticidas, medida que permite mantener controlada la población del insecto.

- **Ganado**

El ramoneo de animales puede provocar grandes daños en el huerto, especialmente en los primeros años y sobre todo si el huerto no está cercado.

- **Fuego**

Deben establecerse y mantenerse cortafuegos de 10 m alrededor del huerto, libre de vegetación inflamable. También debe existir una vigilancia estricta en períodos de mayor peligro de incendios.

- **Viento**

Como se señaló anteriormente, el viento puede provocar daños no solo en los árboles sino también en las plantas en las primeras edades. Se produce el efecto “vaso” que puede llevar a la muerte de los rametos. Una forma de minimizar las consecuencias es con la utilización de tutores que permiten reducir el movimiento constante de la planta y el consecuente roce del cuello de la misma con el suelo (Figura N° 6). Se debe tener en cuenta que las especies del género *Eucalyptus* tienden a desarrollar un sistema aéreo considerable en muy corto tiempo y por ello presentan una alta susceptibilidad a quebrarse.



Figura N° 6
RAMETO ESTABLECIDO CON TUTOR EN HSC DE *Eucalyptus* sp

Manejo de la Floración

- Formación de la Copa

Cuando los árboles crecen en forma silvestre, sin ningún tipo de intervención, lo hacen siguiendo la arquitectura propia de la especie y las posibilidades que les ofrece su entorno (competencia). Esto, desde el punto de vista de la producción de flores, presenta algunos inconvenientes, como el entrecruzamiento de las ramas, que se agrava con la edad del árbol e impide la penetración de la luz solar, y un aumento considerable del volumen de la copa (porción vegetativa) en desmedro de la producción de flores. Otro inconveniente es la gran altura que alcanzan los árboles, dificultando la actividad de polinización controlada y la colecta de semillas. Es por esto que se hace necesaria la poda de formación, que tiene por objetivo disminuir esos inconvenientes mediante la construcción de un esqueleto base, con suficiente solidez mecánica (Barrio *et al.*, 2008), que soporte las cosechas y los cruzamientos controlados, los embates del viento, nieves y otros, y que sea realizada de una forma tal que permita una mejor penetración de energía solar y aireación.

Tan pronto como el injerto es suficientemente grande para nutrir el sistema radical y mantener buen crecimiento, las ramas del patrón deben podarse para prevenir errores en la identificación del injerto y para que estas ramas “no mejoradas” no produzcan flores y polen.

Conforme los árboles crecen, se necesitan más podas para facilitar la cosecha y otras actividades. Las heridas de las podas pueden ser una entrada para infecciones de muchas enfermedades. La poda no debería ser excesiva, ya que esto puede promover el crecimiento vegetativo y no la actividad sexual, y debilitar al árbol si se remueve un gran porcentaje de la copa viva. Las ramas siempre se deben cortar a ras del fuste, sin dañar el anillo de cicatrización, en forma oblicua y con una sierra de podar.

La poda apical (*topping*) de la rama principal promoverá el desarrollo de las ramas laterales, que son especialmente productoras de flores, y permitirá disminuir la altura del rameto, de modo de facilitar labores de cosecha y manejo. La poda apical en lo sucesivo deberá repetirse todas las veces que sea necesario para no sobrepasar la altura deseada (5 a 6 m) como se aprecia en la Figura N° 7. Las especies de *Eucalyptus*, y en especial *E. nitens*, tienen un crecimiento extremadamente alto y vigoroso por lo cual es altamente probable tener que realizar estas podas anualmente.

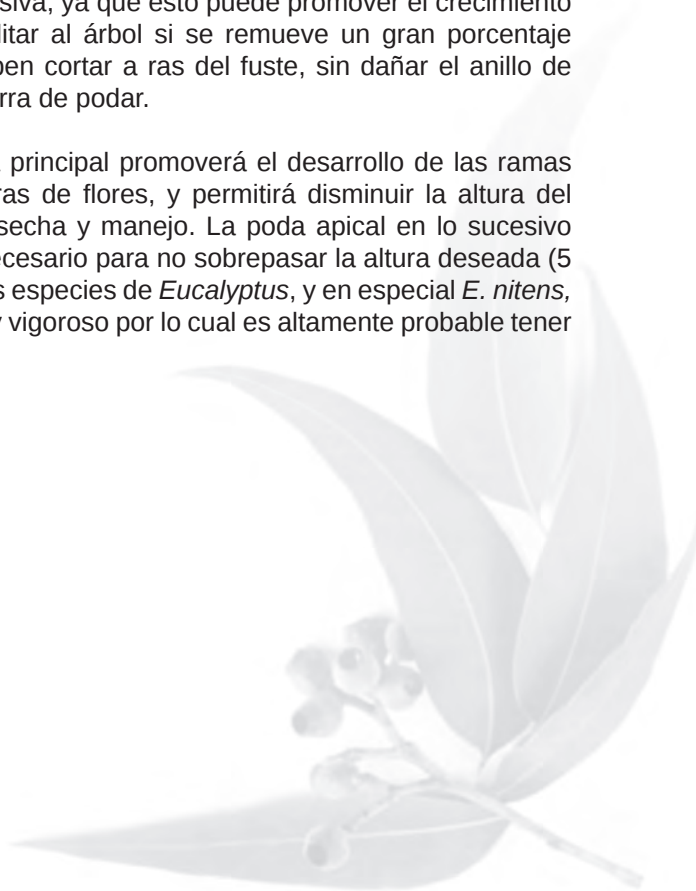




Figura N° 7
PODA APICAL (TOPPING) DE CLONES PARA MANEJAR SU ALTURA
Y PROMOVER EL DESARROLLO DE RAMAS LATERALES

- **Inducción de la Floración**

El principal factor que afecta la floración es la iluminación y por ello es tan importante el manejo de las copas de los rametos, pero la floración también se puede inducir a través de la utilización de productos químicos que la favorezcan, por ejemplo hormonas. Es el caso de algunos productos comerciales cuyo ingrediente activo es Paclobutrazol, el cual es una antigiberelina y tiene los siguientes efectos sobre la planta:

- Retarda el crecimiento vegetativo
- Favorece la formación de yemas y producción de frutos
- Acelera la entrada en receso
- Induce floración precoz

Se ha observado en HSC de *Eucalyptus* un cierto grado de asincronía entre clones de distintas procedencias. En este caso, es recomendable cosechar el polen de los clones que florecen primero y aplicarlo a los clones con floración posterior. Igualmente de los clones con floración tardía se debe extraer polen para aplicarlo en la temporada siguiente en los clones que florecen primero. De esta forma, se maneja la panmixia en el HSC cuando se utiliza la técnica de polinización controlada.

Evidentemente, en clones con manejo preferentemente con polinización controlada, la asincronía no será un problema grave, pero si es necesario evaluar las combinaciones específicas más adecuadas para un determinado carácter de mejoramiento genético así como las compatibilidades entre individuos.

La evaluación señalada considera necesariamente pruebas de terreno de árboles y progenies (Ensayos de Progenies de Polinización Abierta, EPPA), lo cual involucra un tiempo razonable, que en *E. nitens* puede ser de a lo menos 6 años porque es a partir de esta edad que se generan características madereras determinantes para la generación de algunos productos.

Depuración

Consiste en remover del huerto semillero todos los clones que se muestran genéticamente inferiores de acuerdo a los resultados de los Valores de Mejora de sus EPPA. También deben ser removidos aquellos clones susceptibles a enfermedades o deformaciones, así como aquellos que mueren como consecuencia de la incompatibilidad entre púa y patrón. Estos últimos, si eventualmente son importantes en cuanto a su calidad para la característica por la cual fueron seleccionados o bien por su capacidad de producción de semillas, pueden ser reemplazados a través de la reinjertación sobre diferentes patrones que pudieran otorgar un mayor grado de compatibilidad entre púa y patrón.

La intensidad de la depuración está determinada por la ganancia genética que se espera del huerto semillero, una mayor ganancia genética se obtiene con una intensidad mayor de depuración. Sin embargo, en algunas ocasiones la ganancia genética debe ser sacrificada por la producción de semilla, la eliminación de varias familias o clones causa la reducción de la producción de semilla del huerto y, por lo tanto, hay que buscar un equilibrio entre intensidad de depuración y producción de semilla. Del mismo modo, se puede aumentar el grado de participación de algún clon con mejores resultados una vez que se eliminan aquellos con desempeño deficiente. En este caso, la localización de estos nuevos rametos debe procurar no aumentar la autopolinización del huerto, lo que iría en desmedro de la calidad de semillas y potenciales plantas obtenidas.

Dado que la característica que se mejorará con este huerto se relaciona con la calidad de la madera, será fundamental evaluar este rasgo en los ensayos de progenie que serán establecidos para evaluar la calidad del huerto. Esta evaluación no será antes de que las familias presentes en los EPPA estén en la madurez suficiente donde se manifiestan las propiedades de la madera, tanto químicas como mecánicas.

CONCLUSIONES

En el huerto clonal será posible representar todos los clones seleccionados por un mayor contenido de lignina, lo que se estima está relacionado con menores tensiones de crecimiento.

El sitio elegido para el establecimiento del huerto posee características climáticas muy adecuadas para el desarrollo de la especie.

Los protocolos de establecimiento y mantención definidos permiten asegurar la permanencia y productividad de los clones

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Forestal Mininco S A y a ProNitens por sus aportes con información y recursos para seleccionar el material genético y permitir difundir los antecedentes de la instalación de este huerto.

REFERENCIAS

Alvarado, A y Sartori, A., 2006. *Gonipterus scutellatus* Gyllenhal (*Coleoptera: Curculionidae*), Gorgojo del Eucalipto. Nota Técnica año 24 N°47. CONAF, Santiago. 8 pág.

Bailleres, H., Chanson, B., Fournier, M., Toller, M. T. and Monties, B., 1995. Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'*Eucalyptus*.

Balocchi, C. y Delmastro, R., 1992. Principios de Genética Forestal. Impreso de la Central de Publicaciones. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 180 p.

Barrio M., Castedo F., Majada J. y Hevia A., 2008. Manual básico de la poda y formación de los árboles forestales. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 256 páginas.

Chueca, J., 1997. Problemática asociada al arbolado existente en los parques urbanos y periurbanos de nueva creación. Congreso Internacional de IFPRA en Madrid - Octubre de 1997

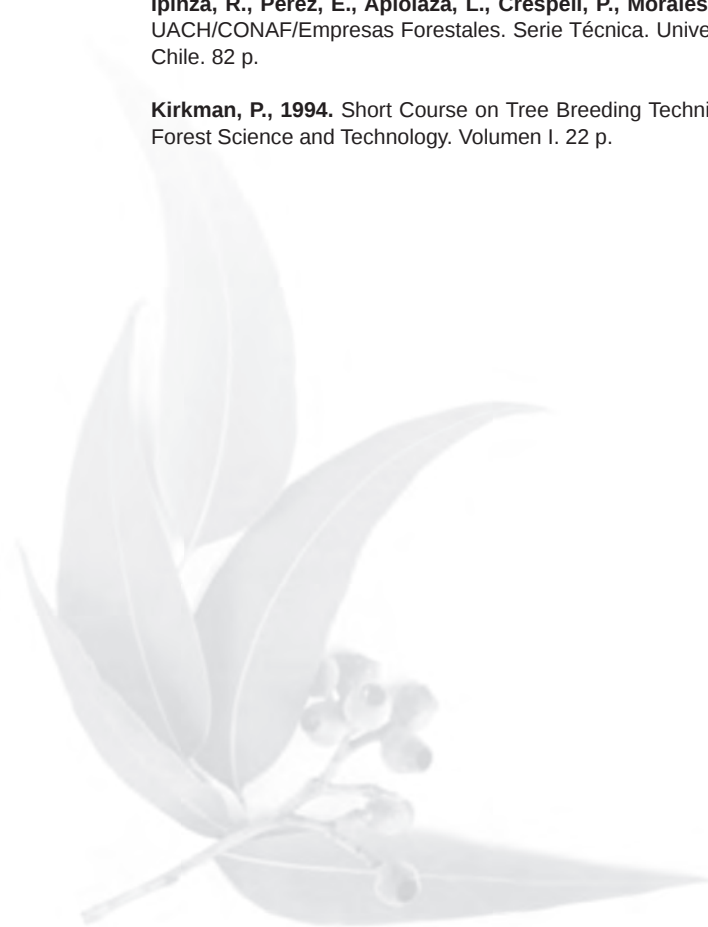
Emhart, V. 1998. Establecimiento y Manejo de Huertos Semilleros Clonales de Polinización Abierta. En: Curso Mejora Genética Forestal Operativa. Eds. Ipinza, R.; Gutiérrez, B. y Emhart, V. Valdivia, Octubre de 1998.

Ipinza, R., 1993. Consideraciones básicas para la instalación de huertos semilleros clonales de eucaliptos. CMG/ UACH/CONAF/Empresas Forestales. Circular N° 264. 14 p.

Ipinza, R., Pérez, E., Apolaza, L., Crespell, P., 1993. Décimo Informe Anual, (1993). CMG/ UACH/ CONAF/ Empresas Forestales. Serie Técnica. Universidad Austral de Chile. Fac. de Cs. Forestales. Valdivia, Chile. 78 p.

Ipinza, R., Pérez, E., Apolaza, L., Crespell, P., Morales, E., 1994. Informe Anual Décimoprimer, (1994). CMG/ UACH/CONAF/Empresas Forestales. Serie Técnica. Universidad Austral de Chile. Fac. de Cs. Forestales. Valdivia, Chile. 82 p.

Kirkman, P., 1994. Short Course on Tree Breeding Techniques. 2 - 20 Mayo 1994. Forestek, Nelspruit. Division of Forest Science and Technology. Volumen I. 22 p.





12. TRANSGÉNICOS EN LOS SECTORES AGRÍCOLA Y FORESTAL. AVANCES, BENEFICIOS Y DESAFÍOS

Miguel Ángel Sánchez Z.¹

INTRODUCCIÓN

Así como la ingeniería genética se emplea para introducir en bacterias genes de otros organismos para que sinteticen medicamentos o productos industriales (Adrio & Demain, 2010), también sirve para incorporar genes a las plantas de importancia agrícola y/o forestal con el fin de mejorar sus características productivas, nutricionales, o de calidad. Uno de los objetivos de esta tecnología es aumentar la productividad de los cultivos contribuyendo a una agricultura sustentable. De esta forma se busca producir más, usar menor superficie forestal y/o agrícola, disminuir los costos de producción, utilizar prácticas más amigables con el medio ambiente (en comparación a la agricultura convencional), y obtener productos de mejor calidad. También se propone mejorar los alimentos, eliminando sustancias tóxicas o alergénicas, modificando la proporción de ciertos componentes o aumentando el valor nutricional de las materias primas vegetales.

Otra aplicación de la biotecnología vegetal es el empleo de las plantas como biorreactores o fábricas para la producción de medicamentos, anticuerpos, vacunas, biopolímeros y biocombustibles (Ahmad *et al.*, 2012).

Hoy la ingeniería genética se suma a las prácticas empleadas de forma rutinaria en el mejoramiento genético de los cultivos. En este sentido, esta metodología ofrece ventajas respecto al mejoramiento genético basado en la generación de variabilidad genética mediante cruzamientos dirigidos.

Entre las ventajas, se puede destacar la posibilidad de ampliar el ecervo de genes disponibles para los mejoradores de plantas más allá de la especie en cuestión (por ejemplo, un gen de una bacteria puede incorporarse al genoma de un eucalipto). Además, esta herramienta permite la posibilidad de introducir un único gen de forma precisa, disminuyendo la posibilidad de observar efectos no esperados, y preservando en la descendencia el resto de los caracteres existentes en la planta original (Gong & Wang, 2013; Ricroch *et al.*, 2011).

En la actualidad, el desarrollo, uso y comercialización de cultivos transgénicos se ha extendido a muchos países a nivel global, sin embargo existen muchos mitos sobre los cultivos transgénicos y sus alimentos derivados, principalmente debido al desconocimiento de la ciudadanía sobre estos temas de aplicación científica difícil de entender, al temor natural a las nuevas tecnologías y a la gran cantidad de información errada que se difunde como correcta, sobre todo en internet.

¹ Biólogo. Dr. en Ciencias Biológicas con mención en Genética Molecular y Microbiología (PhD). Director Ejecutivo, ChileBio. masanchez@chilebio.cl

Nunca antes se había estudiado tanto una innovación dentro de la agricultura como se ha hecho con la biotecnología y la ingeniería genética, las cuales han resultado exitosas como herramientas agrícolas, y poseen potencial suficiente para destacarse aún más en los próximos años (Ronald, 2011; Unión Europea, 2010; Key *et al.*, 2008; Organización Mundial de la Salud, 2004).

OBTENCIÓN DE UNA PLANTA TRANSGÉNICA

La primera etapa del proceso de obtención de una planta transgénica se denomina transformación genética. En muchas especies vegetales es posible introducir genes a través de una bacteria del suelo, llamada *Agrobacterium tumefaciens* (Caplan *et al.*, 1983). Durante la infección, esta bacteria le transfiere a la planta un fragmento de su propio ADN, que termina integrándose en algún cromosoma de la célula vegetal. Mediante ingeniería genética se puede insertar un gen de interés en este ADN, para que sea también transferido a la célula vegetal e insertado en el genoma de la planta (Zambryski *et al.*, 1983). Sin embargo, no todas las especies pueden ser transformadas usando *A. tumefaciens*. Por eso se ha desarrollado un método alternativo, denominado “bombardeo con micropartículas”, también llamado biolística o biobalística (Klein *et al.*, 1987). En este método, se recubren micropartículas de oro o de tungsteno con el ADN a transferir, las cuales son aceleradas en una “pistola” para adquirir suficiente velocidad y poder penetrar la célula vegetal.

Una vez efectuada la transformación genética (usando biolística o *A. tumefaciens*), las células que recibieron el gen de interés se seleccionan empleando antibióticos o herbicidas en el medio de cultivo. En este sentido, además del gen de interés se introducen otros genes, denominados “marcadores de selección” que le confieren resistencia a las células que los llevan (Miki & McHugh, 2004). Las células vegetales son totipotentes, es decir, una célula de cualquier tejido de la planta posee el potencial de generar una planta completa. Para eso, las células transformadas se cultivan *in vitro* en el laboratorio hasta regenerar plantas completas, que tienen en todas sus células el gen de interés.

Posteriormente, mediante metodologías de mejoramiento genético tradicional se logra la incorporación del gen de interés a las variedades de valor comercial que requieren los agricultores o productores forestales.

CARACTERÍSTICAS MODIFICADAS EN LA PLANTAS TRANSGÉNICAS

Desde 1982, con el desarrollo de una planta transgénica de tabaco resistente a un antibiótico (Fraley *et al.*, 1983), los científicos han desarrollado y evaluado distintas plantas y árboles transgénicos que pueden tolerar herbicidas, resistir el ataque de insectos o virus y producir frutos con mejores características nutricionales o flores de otros colores, entre otras.

Como ejemplo de ello existen plantas comerciales de maíz que producen una proteína insecticida con resistencia a insectos lepidópteros y tomates experimentales que pueden mantenerse maduros por más tiempo de forma previa y durante su transporte.

Hasta el momento la transformación genética se ha utilizado para mejorar la resistencia a plagas, la tolerancia a herbicidas, el valor nutricional y la calidad de los alimentos, y la tolerancia a estreses abióticos como la sequía.

Cultivos Resistentes a Insectos

La denominación Bt deriva de *Bacillus thuringiensis*, una bacteria común del suelo y cuyas esporas contienen proteínas tóxicas sólo para las larvas de ciertos insectos. El gen responsable de la síntesis de esta proteína se ha identificado y hoy los científicos han logrado encontrar diferentes tipos de estos genes, los cuales producen proteínas denominadas Cry con acción específica contra diferentes tipos de insectos (Sanahuja *et al.*, 2011; Roh *et al.*, 2007).

Los cultivos Bt fueron genéticamente modificados para producir en sus tejidos proteínas Cry. Así, cuando las larvas de ciertos insectos intentan alimentarse de alguna parte de la planta, mueren. Estas proteínas Cry, se activan en el sistema digestivo del insecto y se adhieren a su epitelio intestinal, alterando así el equilibrio osmótico del intestino, produciendo la muerte del insecto. Las proteínas Cry son muy específicas para determinados tipos de insectos, siendo inocuas para mamíferos, aves e insectos “no-blanco”. Por ejemplo, las proteínas Cry expresadas en plantas transgénicas son completamente inocuas para las abejas (Hendriksma *et al.*, 2013). En el hombre tampoco causan daño pues nuestro intestino carece de los receptores para esta proteína. Además, las proteínas Cry solamente actúan en medios alcalinos, como el del intestino del insecto, y no en ácidos, como el del hombre (Kumar *et al.*, 2008).

Los beneficios de los cultivos Bt se basan en la posibilidad de expresar el potencial de rendimiento en presencia de la plaga y una disminución en el número de aplicaciones de insecticidas, lo que constituye un beneficio económico y ambiental. Se ha demostrado además que el maíz Bt contiene niveles mucho menores de micotoxinas, en comparación con el maíz no Bt, y esto es debido a que al no haber daño por insectos en las plantas, no hay forma de que los hongos productores de estas toxinas, muy peligrosas para la salud humana y animal, la infecten (Sanahuja *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2008).

Ejemplos de cultivos transgénicos resistentes a insectos disponibles comercialmente son el maíz, algodón, soya y álamo. Experimentalmente se han desarrollado pinos resistentes a insectos.

Cultivos Tolerantes a Herbicidas

El crecimiento de las malezas disminuye drásticamente el rendimiento y la calidad de los cultivos. Muchos herbicidas sirven para un determinado tipo de malezas y suelen dejar residuos que permanecen en el suelo por años. El empleo de cultivos transgénicos tolerantes a herbicidas resuelve estos problemas, ya que estos cultivos son tolerantes a los herbicidas glifosato o glufosinato, ambos de amplio espectro (es decir, eliminan a todas las malezas, exceptuando aquellas plantas tolerantes a dichos herbicidas) y de menor efecto residual que los herbicidas tradicionales. Además, los cultivos tolerantes a glifosato facilitan la siembra directa, con los consecuentes beneficios económicos y ambientales derivados de esta práctica (Green, 2012).

En las plantas, la enzima 3-enolpiruvilshiquimato-5-fosfato sintasa (EPSPS) es clave para la síntesis de los aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina, triptófano). Esta enzima solo está presente en plantas y microorganismos, y ausente en animales y humanos. En la década del 70 se descubrió que el glifosato podía inhibir a la enzima EPSPS, impidiendo la

producción de aminoácidos aromáticos. Su capacidad herbicida radica en que los aminoácidos son esenciales para la síntesis proteica y esta a su vez es fundamental para el crecimiento y las funciones de las plantas. Las plantas tolerantes a glifosato tienen el gen *epsps* de la cepa CP4 de la bacteria del suelo *Agrobacterium tumefaciens*. Como la enzima EPSPS producida en esta cepa bacteriana no es afectada por el glifosato, su introducción en el genoma de las plantas las vuelve tolerantes al herbicida. Una de las formulaciones comerciales del glifosato es “Roundup”, por eso, quienes desarrollaron esta tecnología denominaron a los cultivos tolerantes al glifosato “Roundup Ready”, o RR (Funke *et al.*, 2006).

Ejemplos de cultivos transgénicos tolerantes a herbicidas disponibles comercialmente son la soya, canola (conocida también como raps o colza), maíz, remolacha azucarera y alfalfa. Experimentalmente también se han desarrollado eucaliptos tolerantes al herbicida glifosato.

Resistencia a Virus

La biotecnología ofrece alternativas que permiten insertar en las plantas genes que codifican la proteína de la cubierta de los virus (cápside), los cuales al ser transferidos mediante métodos de ingeniería genética expresan la proteína y confieren la resistencia. Otros métodos incluyen la “tecnología del ARN anti-sentido” (Yu *et al.*, 2011).

Ejemplos de cultivos transgénicos con la característica de resistencia a virus disponibles comercialmente son la papaya hawaiana y una variedad de zapallo italiano (zucchini).

Maduración Retardada

La maduración de las frutas es un proceso fisiológico y molecularmente complejo que produce el ablandamiento de las paredes celulares y que afecta el color, sabor y aroma de los productos.

Este proceso es inducido por la producción de una hormona vegetal, el etileno. La biotecnología ofrece una alternativa para retardar la maduración y consiste en interferir en la producción de etileno para lograr que las frutas permanezcan más tiempo con el sabor y color. El bloqueo de la producción de etileno se logra mediante la tecnología “anti-sentido”, que consiste en la neutralización de la expresión del gen (Gupta *et al.*, 2013).

A pesar de no ser un cultivo disponible comercialmente en la actualidad, un ejemplo de cultivo transgénico con características de maduración retardada es el tomate.

Resistencia a Condiciones Ambientales Extremas

Este tipo de resistencia permite obtener cultivos capaces de desarrollarse en sitios desérticos, con altas concentraciones de sal y bajas o altas temperaturas (Zurbriggen *et al.*, 2010). Por ejemplo, las plantas contienen compartimentos denominados vacuolas, donde es posible colocar el exceso de sal para que no se afecte el funcionamiento del resto de la célula. La biotecnología permite que las células depositen la sal en estas vacuolas a través de la inserción de genes que codifican una proteína encargada de bombear la sal de las partes de la célula a la vacuola. De forma similar, se ha avanzado en el desarrollo de plantas tolerantes a la sequía, mediante la introducción del gen *cspB* de la bacteria *Bacillus subtilis*,

cuya función ayuda a mantener el rendimiento fisiológico normal de la planta a través de la unión a moléculas de ARN y desplegándolas para que puedan funcionar normalmente (Yang *et al.*, 2010).

Productos que se encuentran en desarrollo y que aún no son comerciales son un tomate tolerante a heladas, maíz, soya y trigo tolerante a sequía.

Mejoramiento de la Calidad Nutricional

La biotecnología permite aumentar los contenidos vitamínicos de ciertos cultivos (Mc Gloughlin, 2010). Por ejemplo, el arroz es fortificado con un precursor de la vitamina A (β -caroteno) para contribuir a solucionar la deficiencia de esta vitamina que causa ceguera en niños. Los investigadores insertaron al arroz un gen precursor de la vitamina A y modificaron la ruta de síntesis del β -caroteno con dos genes procedentes de otras especies.

Otra especie que ha recibido una mejora en su contenido nutricional es el maíz, que gracias a la modificación genética cuenta con un mayor contenido de vitamina E. Este maíz posee un gen de cebada que incrementa seis veces el contenido de vitamina E, un poderoso antioxidante que favorece la respuesta inmune. Adicionalmente, existe un maíz con mayor contenido de lisina, uno de los 9 aminoácidos esenciales para los seres humanos (se considera esencial porque no es sintetizado por las células humanas, y por tanto debe ingerirse con la dieta).

Por su parte, se ha modificado un tomate para que produzca un mayor contenido de folato. A este tomate se le transfirió un gen bacteriano para la producción del precursor del ácido fólico (Vitamina B12), cuya deficiencia se asocia con anemias.

La yuca es un alimento básico para millones de personas en el África subsahariana, América del Sur y algunas partes de Asia. La raíz de yuca, es rica en hidratos de carbono y almidón, pero baja en proteínas y vitaminas. Científicos han desarrollado un mecanismo para fortalecer la yuca con suficientes proteínas, vitaminas y minerales para proporcionar un alimento lo suficientemente nutritivo. Los investigadores han desarrollado también variedades de yuca que producen menos cianógenos, compuestos que pueden desencadenar la producción de cianuro, yucas con más contenido de hierro y zinc, y carotenoides y terpenoides buscando fortalecer la planta con vitaminas A y E.

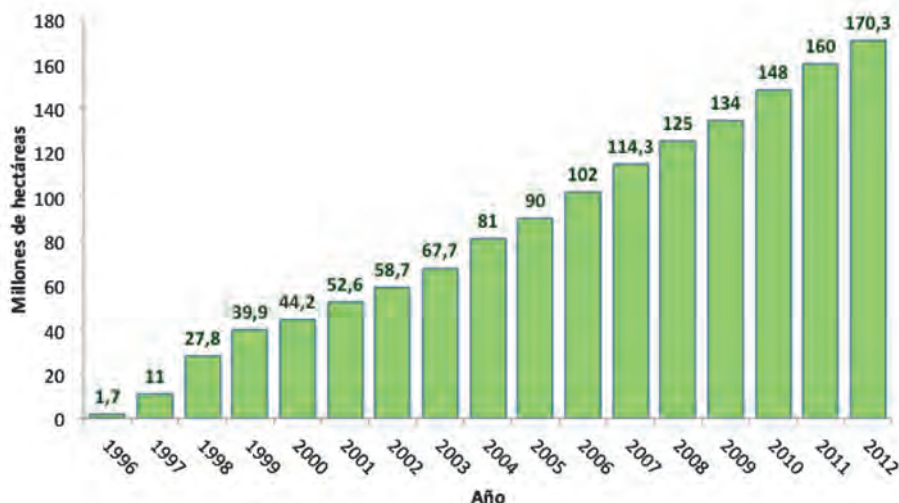
No existen aún productos comerciales modificados genéticamente para tener un mejor contenido nutricional.

PANORAMA MUNDIAL DE LOS CULTIVOS TRANSGÉNICOS DISPONIBLES COMERCIALMENTE

Superficie con Cultivos Transgénicos

Según el informe del ISAAA (Servicio para la Adquisición de Aplicaciones Agrobiotecnológicas), en 2012 se sembraron en todo el mundo 170,3 millones de hectáreas con cultivos transgénicos, un 6% (10 millones de hectáreas) más que en 2011 (Figura N° 1). Los 1,7 millones de hectáreas de 1996 se han multiplicado por 100, hasta alcanzar los 170 millones actuales, dato que convierte a los cultivos transgénicos en la tecnología que más

rápida aceptación ha encontrado en la historia de la agricultura moderna. A nivel global, las 170 millones de hectáreas de cultivos transgénicos representan un 11% de las 1.500 millones de hectáreas destinadas para siembra de cultivos (James, 2012).



(Fuente: Elaborado a partir de James, 2012)

Figura N° 1
EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE GLOBAL CON CULTIVOS TRANSGÉNICOS

Cada país que ha implementado el uso de los cultivos transgénicos se ha encargado de crear un marco regulatorio que establece las reglas y la institucionalidad a cargo. En el caso de EEUU, la FDA (Food and Drug Administration), el USDA (Departamento de Agricultura) y la EPA (Agencia de Protección Ambiental) no aprueban productos transgénicos hasta que se demuestre que son inocuos para el consumo humano y para el medio ambiente. Hoy en ese país hay 177 eventos transgénicos con aprobaciones para consumo humano, de los cuales 148 también tienen aprobación para ser liberados al medio ambiente, distintos tipos de aprobaciones (no necesariamente comerciales) y más de 66 millones de hectáreas con cultivos transgénicos.

En el caso de la Unión Europea (UE), la Comisión Europea ha declarado que los cultivos transgénicos no representan más riesgo para las personas y el medio ambiente que cualquier otro cultivo, y la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha aprobado 46 eventos transgénicos para consumo humano y 2 eventos para su producción agrícola. En este contexto, en 2012 el cultivo en España de maíz transgénico resistente a insectos (maíz Bt), alcanzó el récord histórico de adopción con 116.307 hectáreas, representando el 30% del total de maíz grano sembrado en ese país. Otros países de la Unión Europea que utilizan cultivos transgénicos son Portugal, República Checa, Eslovaquia y Rumania.

Por su parte Sudáfrica, país referente de la economía de África, en 2012 alcanzó 2,9 millones de hectáreas de maíz, soja y algodón transgénicos. Burkina Faso, Sudán y Egipto también utilizan esta tecnología en sus campos, contribuyendo a que en el 2012 el continente africano haya aumentado un 26% las hectáreas destinadas a cultivos transgénicos con respecto al 2011.

En Asia, países como India (10,8 millones de hectáreas de algodón transgénico), China (4 millones de hectáreas de algodón y álamo transgénicos), Pakistán (2,8 millones de hectáreas de algodón transgénico) y Filipinas (0,8 millones de hectáreas de maíz transgénico) lideran la producción de cultivos biotecnológicos. Hay que destacar el rol de China e India en relación a la biotecnología agrícola, donde instituciones estatales financiadas con fondos públicos están desarrollando nuevos cultivos transgénicos para satisfacer las necesidades de su propia agricultura. En el caso de India, tienen la ambiciosa meta para el año 2020 de duplicar la producción agrícola utilizando la biotecnología como herramienta fundamental.

En Brasil, país que cuenta con 36,6 millones de hectáreas de cultivos transgénicos de maíz, soja y algodón, la Comisión Técnica Nacional de Bioseguridad (CTNBio) aprobó recientemente la liberación para el cultivo comercial de un poroto transgénico resistente al virus del mosaico dorado, el peor enemigo del cultivo en Brasil y América del Sur. Desarrollado por la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (Embrapa), la que es equivalente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile (INIA), este poroto es el primer cultivo transgénico totalmente producido por instituciones de investigación pública. Con esta aprobación Brasil ya cuenta con 36 eventos transgénicos aprobados para su comercialización y es el segundo productor mundial de transgénicos tras EEUU. En Argentina, donde hay casi 24 millones de hectáreas de cultivos transgénicos de maíz, soja y algodón, en 2012 el Ministerio de Agricultura autorizó nuevos eventos de sojas y maíces. Así, Argentina se ha posicionado como el tercer productor mundial de cultivos biotecnológicos.

El Paraguay, el Ministerio de Agricultura y Ganadería ha aprobado la liberación comercial de eventos de soja, algodón y maíz transgénicos, alcanzando en 2012 las 3,4 millones de hectáreas. Por su parte, Uruguay con eventos de soja y maíz transgénicos posee más de 1,4 millones de hectáreas con estos cultivos. Bolivia cuenta con más de 1 millón de hectáreas de soja transgénica, lo que representa casi el 95% de la soja producida en Bolivia. Colombia cuenta con casi 100.000 hectáreas de maíz y algodón transgénicos y además ha aprobado la siembra comercial de rosas y claveles azules genéticamente modificados, las cuales están destinadas exclusivamente a la exportación.

Hay que destacar que 20 de los 28 países productores de cultivos biotecnológicos en 2012 eran países en desarrollo, mientras que los otros 8 eran países industrializados. Los 10 primeros países cultivaron más de 1 millón de hectáreas cada uno, sentando las bases para el futuro crecimiento de una biotecnología agrícola diversificada en todo el mundo; de hecho, los nueve primeros cultivaron más de 2 millones de hectáreas. En estos 28 países vive más de la mitad de la población mundial (el 60% o 4.000 millones de personas).

La soja ha seguido siendo el principal cultivo transgénico en 2012, con 80,7 millones de hectáreas que representan el 47,4% de la superficie agrobiotecnológica mundial, seguida del maíz (55,2 millones de hectáreas o el 32,4%), el algodón (24,3 millones de hectáreas o el 14,3%) y la canola (8,2 millones de hectáreas o el 4,8%). La remolacha azucarera (0,5 millones de hectáreas o el 0,29%) y la alfalfa (0,4 millones de hectáreas o el 0,23%) son cultivos producidos solo en EEUU.

Desde otro punto de vista, en 2012, el 81% (80,7 millones de hectáreas) de las 100 millones de hectáreas de soja sembrada a nivel mundial correspondió a soja transgénica. A su vez, el 81% (24,3 millones de hectáreas) de todo el algodón mundial fue transgénico. De los 159 millones de hectáreas de maíz sembrado a nivel mundial en 2012, el 35% (55,2 millones

de hectáreas) fueron maíz transgénico. Por último, el 30% (9,2 millones de hectáreas) de los 31 millones de hectáreas de canola cultivadas a nivel mundial también fueron transgénicas.

Mercado de Semillas Transgénicas

Se calcula que el mercado de semillas transgénicas alcanzó un valor global de US\$14.840 millones en 2012, mientras que el valor del producto final de grano comercial de cultivos transgénicos de maíz, soja y algodón se cifra, como mínimo, en unos 160.000 millones de dólares anuales. Por su parte, un estudio estimó que el descubrimiento, desarrollo y autorización de cada nuevo cultivo o evento transgénico cuesta unos US\$135 millones (James, 2012).

Según las estimaciones de la empresa Cropnosis, el mercado agrobiotecnológico mundial alcanzó en 2012 un valor de US\$14.840 millones (frente a los US\$13.200 millones de 2011), esto representa el 23% del mercado de protección de cultivos valorado en US\$64.620 millones y el 35% del mercado de semillas comerciales, valorado en US\$34.000 millones. El beneficio estimado a nivel mundial del productor del “producto final” de cosecha comercializada (granos biotecnológicos y otros productos cultivados) es más de diez veces superior que el valor de la semilla biotecnológica.

Situación de los Eventos Transgénicos Autorizados

Si bien son 28 los países que sembraron cultivos transgénicos comerciales en 2012, otros 31 países, llegando al total de 59, han autorizado la importación de cultivos de este tipo para uso alimentario y forrajero y para su liberación al medio ambiente desde 1996.

En total, se han otorgado 2.497 autorizaciones para 319 eventos en 25 cultivos a nivel mundial. De estas autorizaciones, 1.129 son para uso alimentario (uso directo o para procesamiento), 813 son para uso como forraje (uso directo o para procesamiento) y 555 son para siembra o liberación al medio ambiente.

De los 59 países con autorizaciones, EEUU tiene la mayor cantidad de eventos aprobados (196), seguido por Japón (182), Canadá (131), México (122), Australia (92), Corea del Sur (86), Nueva Zelanda (81), Unión Europea (67, incluyendo autorizaciones que han expirado o que se encuentran en proceso de renovación), Filipinas (64), Taiwán (52) y Sudáfrica (49).

El maíz tiene la mayor cantidad de eventos aprobados (121 eventos en 23 países), seguido por el algodón (48 eventos en 19 países), papa (31 eventos en 10 países), canola (30 eventos en 12 países) y soja (22 eventos en 24 países).

El evento que ha recibido la mayor cantidad de autorizaciones es el maíz tolerante a herbicida, evento NK603 (50 autorizaciones en 22 países +UE -27), seguido por la soja tolerante a herbicida, evento GTS-40-3-2 (48 autorizaciones en 24 países +UE -27), el maíz resistente a insectos, evento MON810 (47 autorizaciones en 22 países + UE -27), el maíz resistente a insectos, evento Bt11 (43 autorizaciones en 20 países +UE -27), algodón resistente a insectos, evento MON531 (36 autorizaciones en 17 países + UE -27) y algodón resistente a insectos, evento MON1445 (31 autorizaciones en 14 países + UE -27) (James, 2012).

PANORAMA NACIONAL

El panorama nacional es confuso y de difícil explicación. En Chile existe la resolución 1523 (del 2001) del Servicio Agrícola Ganadero que permite la siembra de semilleros solo con fines de exportación, por lo que los agricultores nacionales no pueden utilizar las semillas para obtener el producto final en Chile (SAG, 2013).

Chile no es un país autosuficiente en producción de granos y es un fuerte importador de estos o de productos derivados de estos. Se estima que Chile importa más del 50% de sus necesidades de maíz y soja y que su principal proveedor es Argentina, donde el 100% de la soja sembrada es transgénica al igual que el 92% del maíz. El segundo proveedor es Estados Unidos, donde un porcentaje superior al 90% de estos cultivos es transgénico. Se debe sumar a esto la importación de subproductos del algodón para la nutrición animal que también es transgénica.

Al no poder sembrar semillas transgénicas para producir y vender en el mercado interno, los agricultores nacionales ven mermada su competitividad en relación a los agricultores extranjeros que utilizan biotecnología de forma rutinaria. La brecha irá aumentando en la medida que aparezcan nuevos eventos o usos que son altamente atractivos desde un punto de vista agrícola y de los consumidores.

Sin duda los elementos centrales que harán la diferencia para que Chile sea un país desarrollado son la innovación y la sustentabilidad. Es decir, la diversificación productiva y el aumento de valor de las exportaciones son áreas donde la biotecnología agrícola y los cultivos transgénicos pueden contribuir para aumentar la competitividad de los productos.

En este contexto, el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) ha trabajado arduamente y con financiamiento público en mejorar a través de la biotecnología (ingeniería genética) variedades de papa para conferir resistencia a bacterias (*Erwinia carotovora*) y virus (virus Y de la papa y virus X de la papa); melones para introducir resistencia al Virus del Mosaico de la Sandía tipo II (WMV-II); frutales de carozo (duraznos y nectarines) para resistencia a enfermedades virales y con mayor vida post cosecha; y en vides para conferir resistencia a enfermedades producidas por el hongo *Botrytis cinerea*. Todos estos casos representan productos de interés para el país (Salazar & Montenegro, 2009).

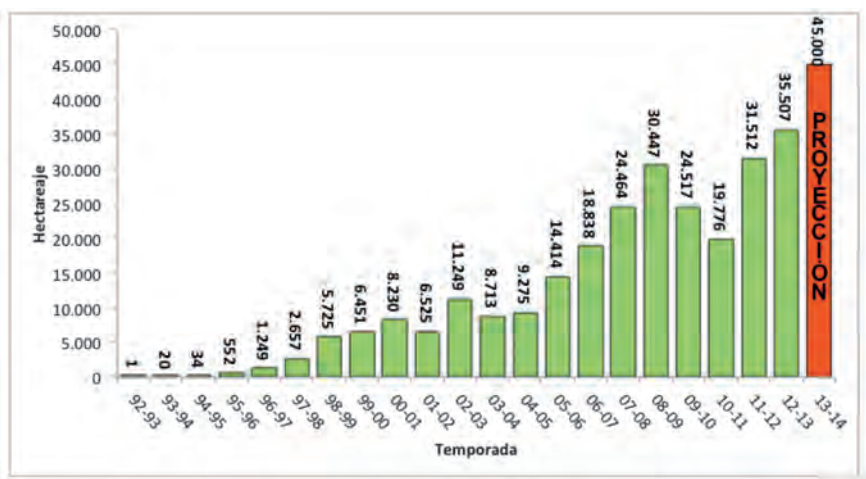
En este mismo sentido, entre los años 2003 y 2007 el estado Chileno financió 35 proyectos biotecnológicos relacionados al sector frutícola, 16 compañías privadas y 19 instituciones públicas fueron financiadas para llevar a cabo proyectos de investigación que involucraban temas de genómica, ingeniería genética, programas de mejoramiento vegetal para introducir resistencia a factores abióticos, identificación genética y trazabilidad de organismos transgénicos. Las principales variedades de frutas en que se trabajó fueron las uvas, cítricos, duraznos y nectarines. Además, en colaboración con el Instituto Forestal, el INIA está llevando a cabo estudios sobre el desarrollo de variedades de eucaliptos tolerantes a la sequía. La Pontificia Universidad Católica se encuentra desarrollando variedades de cítricos resistentes a sequía y tolerantes a deficiencias de nitrógeno; papas resistentes a virus; y pino (*Pinus radiata*) resistente a la polilla del brote (*Rhyacionia buoliana*) y tolerante a glifosato (Salazar & Montenegro, 2009).

Por su parte, como se mencionó anteriormente, a partir del año 2001 en Chile exclusivamente se permite la multiplicación de semillas transgénicas con fines de exportación. La evolución de la superficie sembrada con semillas transgénicas ha crecido considerablemente desde el año 1992 y para la última temporada sobrepasó las 35.500 hectáreas (Figura N° 2). En la temporada 2012/2013 de la superficie total de semilleros transgénicos en el país (35.507 hectáreas), el 82% correspondió a semilleros de maíz (29.244 ha), el 12% a semilleros de canola (4.351 ha) y el 6% a semilleros de soja (1.907 ha). Otras semillas transgénicas que se sembraron en el país correspondieron a semillas de remolacha, tomate, y mostaza parda, las cuales en total representaron menos del 0,0015% de la superficie total de semilleros transgénicos (SAG, 2013).

La importancia de Chile como productor de semillas se debe a que la mayoría de los consumidores se encuentran en el hemisferio norte y la diferencia de estación en el hemisferio sur permite avanzar un año en el calendario agrícola. Mientras en el sur se cosecha en primavera-verano, en el hemisferio norte se encuentran en otoño-invierno, época de la siembra. Así, los programas de mejoramiento genético del hemisferio norte cosechan nuevas líneas y mandan las semillas a Chile para realizar pruebas de campo de contra estación. De esta manera se avanza más rápido en el desarrollo de las nuevas variedades que los agricultores requieren.

En la actualidad Chile ocupa el quinto lugar entre los países exportadores de semillas a nivel mundial, y ocupa el primer lugar en exportadores de semillas transgénicas del hemisferio sur. El tercer rubro de importancia dentro de las exportaciones agrícolas de Chile durante 2012 fueron las semillas, por detrás de la fruta fresca y el vino (ANPROS, 2013).

En la temporada 2012/2013 la industria semillera chilena totalizó exportaciones (exportaciones físicas de semillas + servicios) por US\$520 millones. De éstos, US\$238 millones, equivalentes al 46% del total de las exportaciones, correspondió a exportaciones de semillas transgénicas (ANPROS, 2013).



(Fuente: Elaborado a partir de SAG, 2013 y ANPROS, 2013)

Figura N° 2
EVOLUCIÓN DE LA SUPERFICIE DE SEMILLEROS TRANSGÉNICOS EN CHILE
PARA PRODUCCIÓN DE CONTRAESTACIÓN Y ACTIVIDADES DE I+D

EVALUACIÓN DE LA BIOSEGURIDAD DE LOS CULTIVOS TRANSGÉNICOS

De forma previa a su cultivo, consumo y comercialización, los cultivos transgénicos son evaluados exhaustivamente por las autoridades regulatorias respectivas, esta función en Chile corresponde al Servicio Agrícola y Ganadero. Este proceso se denomina “evaluación de riesgo” o análisis de bioseguridad y se basa en un enfoque comparativo, que se realiza empleando criterios científicos consensuados internacionalmente. Cabe destacar que la evaluación de riesgo se lleva a cabo “caso a caso” (Nap *et al.*, 2003).

Para la evaluación de riesgo se considera los genes introducidos y las proteínas nuevas, la historia de uso de la proteína introducida, de qué organismo proviene, en qué órganos de la planta se fabrica, y la estabilidad genética de la característica introducida.

Desde el punto de vista agronómico, se compara el cultivo transgénico con su par convencional, considerando aspectos morfológicos y fisiológicos de la planta, su potencial de sobrevivir como maleza, la producción y viabilidad del polen, y la transferencia de genes a plantas silvestres. También se estudia la posible toxicidad de la proteína nueva y del cultivo transgénico para los organismos benéficos y “no blanco” y su degradabilidad en el suelo. Estos estudios permiten demostrar que el comportamiento agronómico del cultivo transgénico es equivalente a su par convencional, salvo en la característica introducida (Nap *et al.*, 2003).

Con respecto a los riesgos derivados del consumo humano o animal de los cultivos transgénicos, la evaluación debe asegurar que la modificación genética no haya provocado la aparición de toxinas o alérgenos, y que la composición y aptitud nutricional del alimento sean iguales a las de sus pares convencionales. Cuando los cambios en la composición del alimento son intencionales (por ej. modificación de ácidos grasos) debe estudiarse el balance nutricional más en detalle, sobre todo si se pretende que el nuevo producto reemplace al convencional (EFSA, 2011).

Es importante señalar que no existen riesgos de toxicidad o alergenidad especialmente relacionados con la presencia de material genético (ADN) en los alimentos derivados de cultivos transgénicos, ya que es químicamente igual al material genético de nuestras células. Por otro lado, el material genético ingerido es degradado en el sistema digestivo y no hay ninguna evidencia que algún fragmento de ADN pueda integrarse en cromosomas durante los procesos digestivos (EFSA, 2011).

En este contexto y en base a toda la evidencia técnica y científica disponible (Ammann, 2013; Carpenter, 2011; Ronald, 2011; Unión Europea, 2010; Key *et al.*, 2008; Organización Mundial de la Salud, 2004) se puede afirmar lo siguiente:

- Tras 17 años de producción masiva a nivel global, todos los cultivos transgénicos disponibles comercialmente han demostrado ser inocuos, dentro de lo esperado en base a la evaluación de riesgo desarrollada de forma previa a su autorización de uso. A pesar de lo anterior, la inocuidad alimentaria debe ser y es evaluada caso a caso.
- Los alimentos derivados de los cultivos transgénicos son los alimentos más estudiados en la historia de la humanidad y son sometidos a rigurosos análisis y extensos estudios que determinan su seguridad, los cuales son la base para permitir su comercialización.

- En la mayoría de los casos lo consumido no corresponde al producto cosechado en el campo, sino más bien corresponde a sus subproductos (azúcar, aceites de canola y soya, lecitina de soya, jarabe de maíz, etc.), los cuales no contienen genes. Es decir, no existen diferencias entre un subproducto proveniente de un cultivo transgénico y aquellos derivados de cultivos no transgénicos.
- Los cultivos transgénicos no son más invasores, ni persistentes, ni tienen una mayor capacidad de convertirse en malezas que sus equivalentes convencionales.
- Los cultivos transgénicos tienen la misma posibilidad que las variedades de cultivos tradicionales de transferir genes a especies emparentadas (transferencia horizontal de genes).
- Los efectos secundarios que se han descubierto hasta la fecha a nivel de laboratorio, con evaluaciones sobre-exageradas o que no ocurren en la naturaleza, no han revelado ningún problema a nivel de ecosistema y por ende no tienen significancia biológica.

POSICION DE ORGANISMOS INTERNACIONALES FRENTE A LOS CULTIVOS TRANSGÉNICOS

El mecanismo internacionalmente aceptado, mediante el cual se valida la calidad científica de un estudio, es su publicación en revistas científicas. En la actualidad, existen más de 600 publicaciones científicas (revisadas por expertos) que documentan la seguridad e inocuidad de los cultivos transgénicos disponibles comercialmente y sus alimentos derivados, las que se han convertido en la base y en la evidencia para que distintas organizaciones, academias científicas y agencias regulatorias a nivel mundial hayan emitido declaraciones oficiales confirmando la inocuidad de los cultivos transgénicos actualmente comercializados, reconociendo sus beneficios para la agricultura, el medio ambiente y los consumidores, y aclarando que los riesgos de los cultivos transgénicos son los mismos que los de los cultivos convencionales (ChileBio, 2012).

Organismos como la Organización para la Agricultura y la Alimentación de las Naciones Unidas (FAO) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han establecido estrictos procedimientos para determinar la seguridad de los productos transgénicos, los cuales son tenidos en cuenta por los diferentes sistemas regulatorios alrededor del mundo. Asimismo, diversas organizaciones internacionales de renombre apoyan la biotecnología y los productos derivados de esta técnica.

El consenso científico señala que los riesgos de los productos alimenticios derivados de cultivos transgénicos son fundamentalmente los mismos que los de los convencionales, e incluso menores, existiendo un amplio acuerdo entre los científicos sobre la seguridad de los cultivos transgénicos y sus alimentos derivados. Más de 3.450 renombrados científicos a nivel mundial, incluyendo 25 premios Nobel, han firmado una declaración en apoyo a la Biotecnología Agrícola y los cultivos transgénicos (AgBioWorld) indicando su seguridad para humanos, animales y el medio ambiente. En la actualidad existen más de 50 declaraciones o documentos científicos oficiales (involucrando cerca de 190 organizaciones o sociedades científicas) que ratifican la bioseguridad de los cultivos transgénicos autorizados y sus productos derivados (ChileBio, 2012).

BENEFICIOS DE LOS CULTIVOS TRANSGÉNICOS

Considerando solo los seis cultivos transgénicos más importantes (soja, maíz, algodón y canola tolerantes a herbicidas; maíz y algodón resistentes a insectos), los cultivos transgénicos han proporcionado beneficios económicos valorados en aproximadamente US\$ 98.200 millones entre 1996 y 2011. De estos, el 51% se debió a la reducción de los costos de producción (menos uso de arado, menos aplicación de plaguicidas y menos volumen de trabajo) y el 49% a los aumentos de rendimientos operacionales, cifrados en 328 millones de toneladas. Así lo confirmaron durante 2012 los más de 17,3 millones de agricultores que sembraron 170 millones de hectáreas de cultivos transgénicos en 28 países (Brooks & Barfoot, 2013a; James, 2012).

La creciente evidencia muestra que la biotecnología agrícola ha beneficiado a los agricultores, especialmente en los países en vías de desarrollo, mejorando los rendimientos de los cultivos y las ganancias económicas. Como ejemplo, 49 publicaciones científicas dan cuenta de 168 encuestas realizadas a cientos de agricultores alrededor del mundo, donde un 74% de estas indica un impacto positivo sobre los rendimientos y un 72% señala un impacto positivo de los cultivos transgénicos en los resultados económicos de los agricultores (Carpenter, 2010).

Por otro lado, dependiendo del tipo de cultivo y de la modificación genética, se ha demostrado y documentado extensamente que los cultivos transgénicos aportan una serie de ventajas medioambientales (Brooks & Barfoot, 2013b; James, 2012):

- Reducción en la aplicación de insecticidas/plaguicidas. La reducción del consumo de plaguicidas acumulada entre 1996 y 2011 se cifra en 473 millones de kilos de ingrediente activo, lo que equivale a una disminución del 9% del uso de pesticidas y a una disminución del 18% del impacto ambiental en comparación a la actividad agrícola tradicional sin uso de biotecnología.
- Reducción de la erosión y retención de agua del suelo. Aquellos cultivos transgénicos que tienen la característica de ser tolerantes a herbicidas optimizan las prácticas agrícolas y así facilitan la adopción de sistemas de producción que minimizan o llevan a cero la necesidad del arado, como la cero labranza, lo que conlleva a una reducción de la erosión y a la retención de agua en el suelo.
- Reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. Debido a la reducción del uso de combustibles fósiles por el menor número de aplicaciones de plaguicidas, y al empleo de métodos de cero labranza, en 2011 la reducción de emisiones equivalió a 23.000 millones de kilos de CO₂ aprox., lo que equivale a la emisión de 10 millones de vehículos durante un año completo.
- Conservación de la biodiversidad. Entre 1996-2011 se obtuvo 328 millones de toneladas extras de alimentos, forrajes y fibra gracias a los cultivos transgénicos. Para obtener la misma cantidad extra con cultivos convencionales se habría requerido 109 millones de hectáreas adicionales. Probablemente, bosques y selvas ricos en biodiversidad habrían tenido que ser talados para esto.

Aumentar la eficiencia del consumo de agua tendrá importantes repercusiones para la conservación y disponibilidad de este recurso en todo el mundo. La agricultura consume actualmente el 70% del agua dulce del planeta y es evidente que esto no se podrá sostener en el futuro cuando la población aumente casi un 50% hasta superar los 9.000 millones de habitantes en 2050. Está previsto que los primeros híbridos de maíz biotecnológico con cierto grado de tolerancia a la sequía se comercialicen en Estados Unidos en 2013 y que el primer maíz tropical tolerante a la sequía llegue al África Subsahariana en 2017. Se confía en que la tolerancia a la sequía sea de gran ayuda para aumentar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas en todo el mundo, sobre todo en los países en desarrollo, donde las sequías son más frecuentes y severas que en los países industrializados (James, 2012).

Los pronósticos apuntan a que las sequías, inundaciones y variaciones térmicas serán cada vez más frecuentes y severas, por lo mismo será necesario acelerar los programas de mejoramiento de cultivos para desarrollar variedades e híbridos que se adapten adecuadamente a los rápidos cambios de las condiciones climáticas.

En resumen, los cultivos transgénicos han demostrado su capacidad para contribuir a la sostenibilidad y hacer frente a los desafíos climáticos. Los cultivos transgénicos pueden aumentar la productividad y la renta notablemente y, por tanto, pueden ser un motor de crecimiento económico rural que contribuya a mejorar las condiciones de vida de los pequeños agricultores.

DESARROLLO DE ESPECIES FORESTALES TRANSGÉNICAS

La manipulación genética en el sector forestal se realiza en al menos 35 países, aunque en la mayoría de los casos se trata de experimentos de laboratorio, con tan solo algunas evaluaciones de campo y se limitan esencialmente a especies de los géneros *Populus*, *Pinus*, *Liquidambar* y *Eucalyptus*. El último informe de China ante la Comisión Internacional del Álamo reportó el establecimiento de plantaciones de árboles genéticamente modificados, habiendo sido autorizada la comercialización de *Populus nigra* y de 741 líneas híbridas transformadas con los genes de resistencia a insectos (Marcucci *et al.*, 2010).

La transformación genética de árboles es todavía un instrumento relativamente nuevo en el sector forestal y se realiza a menudo usando sistemas de transformación basados en *Agrobacterium tumefaciens* en angiospermas y por bombardeo con micropartículas en gimnospermas. Los éxitos en especies forestales son hasta el momento limitados debido a las dificultades asociadas a la regeneración de las plantas, especialmente si se considera que muchas especies forestales poseen una limitada capacidad de cultivo *in vitro* y que la transformación genética de una nueva especie depende de su capacidad de regeneración (Marcucci *et al.*, 2010).

Por su parte, las evaluaciones de campo son imprescindibles para el desarrollo de árboles transgénicos útiles y seguros. Una revisión de las bases de datos de acceso público en todo el mundo reveló más de 700 ensayos de campo con árboles transgénicos de especies leñosas perennes (Walter *et al.*, 2010).

A pesar que una de las primeras liberaciones al ambiente de árboles transgénicos fue un ensayo de campo de un álamo tolerante a herbicidas en Bélgica en 1988 (Valenzuela *et al.*, 2006), en la actualidad China y EEUU son los únicos países que utilizan árboles transgénicos

de forma comercial. En el caso de China, se trata de álamos resistentes a insectos, y en el caso de EEUU de papaya (*Carica papaya*) resistente a virus (Harfouche *et al.*, 2011).

Por otro lado, tanto en EEUU como en Europa, el mayor número de ensayos de campo con árboles transgénicos ha sido con álamos, los cuales se han convertido en el foco de la mayoría de las investigaciones de ingeniería genética en árboles. El álamo es una de las pocas especies forestales que por sus características resulta relativamente fácil de transformar y de regenerar *in vitro*. En muchos casos puede ser propagado vegetativamente y es capaz de crecer rápidamente, alcanzando 4-6 metros en 2 años. Ensayos de campo en otros países desarrollados, involucran álamo, abeto blanco (*Picea glauca*) y abeto negro (*Picea mariana*) en Canadá, eucalipto en Australia, eucalipto y pino en Nueva Zelanda, álamo y abedul (*Betula* spp.) en Rusia, y papaya en Japón. Ensayos de campo reportados en China y en otros países como Indonesia, Chile, Brasil, India y Sudáfrica, han realizado avances con álamo, eucalipto, pino y papaya. Inicialmente, las principales características modificadas fueron la tolerancia a herbicidas, la tolerancia a distintos estreses bióticos y abióticos, la mejora del crecimiento y la modificación de las propiedades de la madera. Recientemente, se ha estado investigando en modificar características como la producción de bioenergía, biorremediación, secuestro de carbono, bio-pulpaje y restauración (Harfouche *et al.*, 2011).

En relación a la estructura de la madera, la investigación se ha concentrado en modificar el contenido y la composición de lignina. Muchos de los genes involucrados en la síntesis de la lignina han sido sobreexpresados o inhibidos en árboles como álamo, pino y eucaliptos. Utilizando la estrategia de antisentido para reducir la expresión de genes o aumentando la expresión de otros, se ha logrado una reducción del 45% del contenido de lignina y un aumento del 15% de celulosa en álamos (Marcucci *et al.*, 2010).

Otros objetivos han sido la introducción de resistencia a insectos y hongos, tolerancia a herbicidas y las mejoras relacionadas con la capacidad de crecer en suelos marginales, exhibiendo resistencia o tolerancia a los estreses bióticos y abióticos (como sequías, heladas, inundaciones, alta salinidad, otros). Los genes *cry* de *Bacillus thuringiensis*, que se emplean para cultivos agrícolas, también se han introducido en álamos, pinos, abeto, nogal, alerce y otras especies forestales. Por su parte se ha desarrollado resistencia a hongos en álamos que expresan genes de quitinasas. La resistencia al herbicida glifosato se ha obtenido en álamo, *Picea* y *Pinus*. En el caso de la resistencia o tolerancia a estrés abiótico, se han logrado transformar árboles tolerantes a salinidad, tolerantes a suelos ácidos y sequía (Marcucci *et al.*, 2010).

La modificación de la floración ha sido también blanco de la modificación genética. Al contrario de las especies herbáceas y anuales, los árboles no han sido totalmente domesticados y, por consiguiente, tienen parientes silvestres con los que pueden ser interfértiles; además, son especies longevas, producen cantidades abundantes de polen y semillas que se diseminan a menudo por el viento a distancias considerables. Por lo tanto, para evitar la dispersión de polen de árboles transgénicos en el ambiente, se ha logrado la esterilidad masculina en árboles utilizando un gen que genera ablación citotóxica de estructuras florales únicamente (Marcucci *et al.*, 2010).

En cuanto a la utilización de plantaciones forestales para fitorremediar, se han ensayado diferentes estrategias para aumentar la capacidad de absorción de las raíces. Se han transformado híbridos de *Populus* usando un gen de mamíferos del citocromo P450,

para detoxificar tricloroetileno y otros compuestos halogenados; se han transformado callos embriogénicos de *Liriodendron tulipifera* con un gen modificado de la enzima bacteriana mercurio reductasa (gen *merA*) y se han modificado híbridos de álamo (*Populus alba* x *P. glandulosa*) sobreexpresando un gen de fitoquelatinas (péptidos que unen metales en hongos y plantas), para la eliminación de cadmio (Marcucci *et al.*, 2010).

Por otro lado, entre las principales empresas que participan en el desarrollo de árboles transgénicos se encuentran ArborGen (EEUU), GenFor (Chile), Nippon Paper (Japón), Scion (Nueva Zelanda), Suzano Pulp and Paper (Brasil) y SweeTree Technologies (Suecia). Algunas de estas empresas han establecido colaboración con instituciones académicas para avanzar en las actividades de investigación y desarrollo. Un ejemplo particularmente notable es el trabajo dirigido por ArborGen para diseñar un eucalipto tolerante al frío y estéril, el cual se espera sea el primer árbol forestal autorizado para su uso comercial (Harfouche *et al.*, 2011).

Árboles Transgénicos en América Latina

En algunos países de América Latina se están desarrollando proyectos de transformación genética de árboles para su comercialización. En Chile, a través de un proyecto conjunto del sector privado en acuerdo con algunas universidades, se está tratando de obtener pinos resistentes a la polilla del brote. Investigadores brasileños han participado en el desarrollo de álamos y eucaliptos transgénicos en conjunto con Francia y EEUU. Por otro lado, en ese país, empresas del sector privado de la industria del papel están desarrollando eucaliptos con la cantidad de lignina modificada. En México se están ensayando nuevos genes involucrados en la modificación de la madera para incrementar el crecimiento en *Pawlonia* sp. En Argentina, tanto el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) como la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) han iniciado proyectos de modificación genética de clones de álamos para modificar la lignina, para tolerancia a herbicidas y resistencia a insectos (Marcucci *et al.*, 2010).

Desafíos para la Adopción de Árboles Forestales Transgénicos

Aunque el uso de los árboles forestales transgénicos se acerca cada vez más a la realidad, algunos grupos de interés han manifestado su preocupación por la seguridad de los genes utilizados, el impacto potencial del cruzamiento de estas variedades con parientes silvestres sexualmente compatibles, y el posible impacto sobre los organismos no blanco (van Frankenhuyzen & Beardmore, 2004; Strauss & Bradshaw, 2004).

También se ha manifestado la preocupación sobre la posibilidad de la transferencia horizontal de genes, donde hasta el momento los estudios científicos han demostrado que la probabilidad de transferencia de genes desde los árboles transgénicos a comunidades de microorganismos del suelo es casi nula (Demanèche *et al.*, 2008).

Además, no se han observado cambios en la estructura de la comunidad fúngica ectomicorrícica luego de 8 años de ensayos de campo con álamos transgénicos (Stefani *et al.*, 2009). Del mismo modo, no se observaron efectos no deseados de pinos transgénicos sobre comunidades de invertebrados de la superficie en un periodo de 2 años (Schnitzler *et al.*, 2010). La fuga de genes a través de la propagación vegetativa es otro riesgo que algunos grupos advierten (Williams & Davis, 2005), sin embargo esto puede ser controlado.

Para avanzar con el uso de esta tecnología, las preocupaciones de bioseguridad ambiental deben ser y son evaluadas a través de extensas pruebas de campo, y a su vez, las agencias gubernamentales relacionadas analizan la información para autorizar o no la utilización a gran escala. Recientemente, las autoridades americanas y europeas han comenzado a revisar y modificar sus normas y estrategias para utilizar de forma segura los árboles transgénicos (Harfouche *et al.*, 2011).

Sin embargo, el llamado a la prudencia respecto a la forma en que se utilicen los árboles transgénicos no debería dar lugar a una prohibición para efectuar los estudios de campo. Por el contrario, se necesitan estudios rigurosos para probar hipótesis y desarrollar estrategias que proporcionen un equilibrio entre los costos y los beneficios. Sin lugar a dudas, la seguridad energética y el futuro de los suministros de madera y fibra dependerán de la ciencia que proporcionará las herramientas para la producción eficiente y sostenible de los recursos forestales.

CONCLUSIONES

Cada vez son más los países que adoptan cultivos transgénicos, aumentando a su vez el incentivo a la investigación y desarrollo de productos transgénicos propios. Luego de 17 años de comercialización, en 2012 la superficie con cultivos transgénicos alcanzó las 170,3 millones de hectáreas, un 6% más con respecto al año anterior, representando a su vez el 11% de la superficie arable mundial (un total de 1.500 millones de hectáreas).

Según el tipo de cultivo y de la modificación genética aplicada, la utilización de esta tecnología otorgaría oportunidades para los agricultores (mayores rendimientos y menores costos de producción; competitividad), beneficios para el medio ambiente (menor uso de agroquímicos en relación con la agricultura convencional para producir una misma cantidad de producto; menor emisión de gases de efecto invernadero al haber una menor necesidad de arado), beneficios para los consumidores (menores costos, calidad nutricional del producto final, aseguramiento de la inocuidad, otros), e incentivaría la innovación y desarrollo para necesidades reales de la agricultura nacional.

Por su parte, los argumentos en contra del uso de los organismos transgénicos en los sectores agrícola y forestal son recurrentes, y de forma errada señalan que se utilizan muchos agroquímicos, monocultivos, que hay que utilizar solo productos naturales, que se oponen a la propiedad intelectual en el sector agroforestal, y otros. Todo esto, a pesar de no tener sentido ni sustento, no se basa en ciencia ni en datos reales para decir si los organismos transgénicos son beneficiosos para los agricultores y si son inocuos o no para la salud de las personas, animales y el medio ambiente.

La mayor parte de los científicos y de las academias científicas del mundo han hecho su trabajo y además se han manifestado a favor de los organismos transgénicos, evaluando siempre caso a caso cada nuevo producto desarrollado y así determinando las medidas necesarias para manejar y minimizar los riesgos asociados, los cuales son los mismos que presentan los cultivos tradicionales.

REFERENCIAS

- Adrio, JL. and Demain, AL. 2010.** Recombinant organisms for production of industrial products. *Bioeng Bugs*. 1(2):116-31.
- Ahmad, P.; Ashraf. M.; Younis, M.; Hu, X.; Kumar, A.; Akram, NA. and Al-Qurainy, F. 2012.** Role of transgenic plants in agriculture and biopharming. *Biotechnol Adv*. 30(3):524-40.
- Ammann, K. 2013.** Genomic Misconception: a fresh look at the biosafety of transgenic and conventional crops. A plea for a process agnostic regulation. *N Biotechnol*. doi:pii: S1871-6784(13)00060-5. 10.1016/j.nbt.2013.04.008.
- Asociación Nacional de Productores de Semillas (ANPROS). 2013.** www.anpros.cl
- Brooks, G. and Barfoot, P. 2013a.** The global income and production effects of genetically modified (GM) crops 1996-2011. *GM Crops Food*. 4(1):74-83.
- Brooks, G. and Barfoot, P. 2013b.** Key environmental impacts of global genetically modified (GM) crop use 1996-2011. *GM Crops Food*. 4(2).
- Caplan, A.; Herrera-Estrella, L.; Inzé, D.; Van Haute, E.; Van Montagu, M.; Schell, J.; and Zambryski, P. 1983.** Introduction of genetic material into plant cells. *Science* 222(4625):815-21.
- Carpenter, JE. 2010.** Peer-reviewed surveys indicate positive impact of commercialized GM crops. *Nat Biotechnol*. 28(4):319-21.
- Carpenter, JE. 2011.** Impact of GM crops on biodiversity. *GM Crops*. 2(1):7-23.
- ChileBio. 2012.** Mitos y Realidades de la Biotecnología Agrícola. Disponible en www.chilebio.cl
- Demanèche, S.; Sanguin, H.; Poté, J.; Navarro, E.; Bernillon, D.; Mavingui, P.; Wildi, W.; Vogel, TM. and Simonet, P. 2008.** Antibiotic-resistant soil bacteria in transgenic plant fields. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 105(10): 3957–3962.
- European Food Safety Authority (EFSA) 2011.** Guidance for risk assessment of food and feed from genetically modified plants. *EFSA Journal* 9(5):2150
- Fraley, RT.; Rogers, SG.; Horsch, RB.; Sanders, PR.; Flick, JS.; Adams, SP.; Bittner, ML.; Brand, LA. ; Fink, CL.; Fry, JS.; Galluppi, GR.; Goldberg, SB.; Hoffmann, NL. and Woo, SC. 1983.** Expression of bacterial genes in plant cells. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 80(15):4803–4807.
- Funke, T.; Han, H.; Healy-Fried, ML.; Fischer, M. and Schönbrunn, E. 2006.** Molecular basis for the herbicide resistance of Roundup Ready crops. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103 (35):13010–5.
- Gong, CY. and Wang, T. 2013.** Proteomic evaluation of genetically modified crops: current status and challenges. *Front Plant Sci*. 4:1-8.
- Green, JM. 2012.** The benefits of herbicide-resistant crops. *Pest Manag Sci*. 68(10):1323-31.
- Gupta, A.; Pal, RK. and Rajam, MV. 2013.** Delayed ripening and improved fruit processing quality in tomato by RNAi-mediated silencing of three homologs of 1-aminopropane-1-carboxylate synthase gene. *J Plant Physiol*. 170(11):987-95.
- Harfouche, A.; Meilan, R. and Altman, A. 2011.** Tree genetic engineering and applications to sustainable forestry and biomass production. *Trends Biotechnol*. 29(1):9-17.
- Hendriksma, HP.; Küting, M.; Härtel, S.; Näther, A.; Dohrmann, AB.; Steffan-Dewenter, I. and Tebbe, CC. 2013.** Effect of stacked insecticidal Cry proteins from maize pollen on nurse bees (*Apis mellifera carnica*) and their gut bacteria. *PLoS One*. 8(3):e59589.

James, C. 2012. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2012. ISAAA Brief No. 44. ISAAA: Ithaca, NY. Disponible en <http://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/44/default.asp>

Key, S.; Ma, JK. and Drake, PM. 2008. Genetically modified plants and human health. J R Soc Med 101(6): 290–8.

Kumar, S.; Chandra, A. and Pandey, KC. 2008. *Bacillus thuringiensis* (Bt) transgenic crop: an environment friendly insect-pest management strategy. J Environ Biol. 29(5):641-53.

Klein, TM.; Wolf, ED.; Wu, R. and Sanford, JC. 1987. High-velocity microprojectiles for delivering nucleic acids into living cells. Nature 327, 70-73.

Marcucci, S.; Gallo, L.; Zelener, N.; Torales, S. and Sharry, S. 2010. Biotecnología y Mejoramiento Vegetal II. Capítulo 5 Aplicación de la biotecnología en la mejora y conservación de especies forestales. Ediciones INTA. Disponible en http://intainforma.inta.gov.ar/wp-content/uploads/2010/09/bio_WEB.pdf

Mc Gloughlin, MN. 2010. Modifying agricultural crops for improved nutrition. N Biotechnol. 30;27(5):494-504.

Miki, B. and McHugh, S. 2004. Selectable marker genes in transgenic plants: applications, alternatives and biosafety. J Biotechnol. 107(3):193-232.

Nap, JP.; Metz, PL.; Escaler, M. and Conner, AJ. 2003. The release of genetically modified crops into the environment. Part I. Overview of current status and regulations. Plant J. 2003 Jan;33(1):1-18.

Organización Mundial de la Salud. 2004. Food safety: 20 questions on genetically modified foods. (<http://www.who.int/foodsafety/publications/biotech/20questions/en/>) Acceso en Junio 2013.

Ricroch, AE.; Bergé, JB. and Kuntz, M. 2011. Evaluation of genetically engineered crops using transcriptomic, proteomic, and metabolomic profiling techniques. Plant Physiol. 155(4):1752–61.

Roh, JY.; Choi, JY.; Li, MS.; Jin, BR. and Je, YH. 2007. *Bacillus thuringiensis* as a specific, safe, and effective tool for insect pest control. Journal of microbiology and biotechnology 17(4):547–59.

Ronald, P. 2011. Plant Genetics, Sustainable Agriculture and Global Food Security. Genetics 188(1):11–20.

Salazar, E. and Montenegro, G. 2009 Genetically modified crops in Chile. Cien. Inv. Agr. 36(3):353-368.

Sanahuja, G.; Banakar, R.; Twyman, RM.; Capell, T. and Christou, P. 2011. *Bacillus thuringiensis*: a century of research, development and commercial applications. Plant Biotechnol J. 9(3):283-300.

Schnitzler, FR.; Burgess, EP.; Kean, AM.; Philip, BA.; Barraclough, El.; Malone, LA. and Walter, C. 2010. No unintended impacts of transgenic pine (*Pinus radiata*) trees on above ground invertebrate communities. Environ Entomol. 39(4):1359-68.

Servicio Agrícola y Ganadero de Chile (SAG). 2013. <http://www.sag.cl/ambitos-de-accion/organismos-vegetales-vivos-modificados-ovvm>

Stefani, FO.; Moncalvo, JM.; Séguin, A.; Bérubé, JA. and Hamelin, RC. 2009. Impact of an 8-year-old transgenic poplar plantation on the ectomycorrhizal fungal community. Appl Environ Microbiol. 75(23):7527-36.

Strauss, SH. and Bradshaw, HD. 2004. The Bioengineered Forests: Challenges for Science and Society, Resource for the Future Press.

Unión Europea. 2010. A decade of EU-funded GMO research (2001-2010). Directorate-General for Research and Innovation. Biotechnologies, Agriculture, Food. (http://ec.europa.eu/research/biosociety/pdf/a_decade_of_eu-funded_gmo_research.pdf). Acceso en Junio 2013.

Valenzuela, S.; Balocchi, C. and Rodríguez, J. 2006. Transgenic trees and forestry biosafety. Electron. J. Biotechnol. 9(3), 335-339.

Van Frankenhuyzen, K. and Beardmore, T. 2004. Current status and environmental impact of transgenic forest trees. *Can. J. For. Res.* 34, 1163–1180.

Walter, C.; Fladung, M. and Boerjan, W. 2010. The 20-year environmental safety record of GM trees. *Nat. Biotechnol.* 28(7), 656–658.

Williams, CG. and Davis, BH. 2005. Rate of transgene spread via long-distance seed dispersal in *Pinus taeda*. *Forest Ecol. Manage.* 217, 95–102.

Yang, S.; Vanderbeld, B.; Wan, J. and Huang, Y. 2010. Narrowing down the targets: towards successful genetic engineering of drought-tolerant crops. *Mol Plant.* 3(3):469-90.

Yu, TA.; Chiang, CH.; Wu, HW.; Li, CM.; Yang, CF.; Chen, JH.; Chen, YW. and Yeh, SD. 2011. Generation of transgenic watermelon resistant to Zucchini yellow mosaic virus and Papaya ringspot virus type W. *Plant Cell Rep.* 30(3):359-71.

Zambryski, P.; Joos, H.; Genetello, C.; Leemans, J.; Montagu, MV. and Schell, J. 1983. Ti plasmid vector for introduction of DNA into plant cells without alteration of their normal regeneration capacity. *EMBO J* 2(12):2143–2150.

Zurbriggen, MD.; Hajirezaei, MR. and Carrillo, N. 2010. Engineering the future. Development of transgenic plants with enhanced tolerance to adverse environments. *Biotechnol Genet Eng Rev.* 27:33-56.





III. SELECCIÓN Y MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS PARA CONDICIONES ADVERSAS



13. ANTECEDENTES DE DESARROLLO Y POTENCIAL PRODUCTIVO DE VARIEDADES HÍBRIDAS ENTRE *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus* EN CHILE. LA EXPERIENCIA CMPC¹

Alex Medina^{1,2}
Verónica Emhart¹
Ricardo Navarrete³
Berta Rothen¹
Marcela Labra¹
Edgardo Velilla¹

INTRODUCCIÓN

La hibridación entre especies forestales puede generarse en forma espontánea en bosques naturales y plantaciones o bien en forma asistida a través de programas de cruzamientos controlados. La hibridación natural permite aumentar la variación genética de una especie y generalmente se produce entre especies taxonómicamente cercanas y en contacto geográfico. Por su parte, la hibridación asistida como herramienta de generación de nuevas variedades genéticas es mucho más agresiva y rompe estas barreras taxonómicas y geográficas, así, es común encontrar en la literatura cruza híbridas entre especies de géneros distintos como *Castanea* x *Populus*, *Larix* x *Leptolepis* o *Cupressus* x *Chamaecyparis* (Wright, 1962).

En programas de mejoramiento genético operativos, la hibridación está siendo ampliamente utilizada en el desarrollo de clones que permitan superar el rendimiento de los mejores materiales de especies puras, esto considerando rasgos de productividad, calidad de madera, resistencia a enfermedades o tolerancia a algún estrés ambiental (Potts y Dungey, 2004). Entre los géneros con mayor desarrollo de materiales híbridos operativos se encuentra sin duda el género *Populus*, donde prácticamente el 100% de las plantaciones productivas manejadas se basan en clones híbridos. Dentro del género *Pinus*, el desarrollo de árboles clonales híbridos ha sido más reciente, sin embargo, actualmente ya existen algunos híbridos como *P. elliotii* x *P. caribaea* var. *Hondurensis*, *P. patula* x *P. tecunumanii* y *P. patula* x *P. oocarpa*, los que están siendo usados operacionalmente por diversas empresas del Sur de África, en zonas específicas de Queensland, Australia y en el norte de Argentina. Por su parte los programas de mejoramiento genético del género *Eucalyptus* a nivel mundial y especialmente en países como Brasil, Sud-África, Argentina y Chile, han tenido un creciente cambio hacia el desarrollo de clones híbridos. Lo anterior ha elevado la oferta y la cifra de superficies plantadas con clones híbridos de alto rendimiento, complementando la oferta de especies puras y en algunos casos (especialmente en Brasil) los clones híbridos están sosteniendo el 100% de los programas.

1 Forestal Mininco.SA Compañía Manufacturera de Papeles y Cartones. veronica.emhart@forestal.cmpc.cl

2 CMPC Chile. alex.medina@forestal.cmpc.cl

3 IMF Chile

En CMPC Chile el programa clonal de eucalipto, así como los programas de las especies *Eucalyptus globulus* y *E. nitens*, está orientado a la industria de pulpa y papel y por ende se enfoca en el desarrollo de clones híbridos que permitan aumentar la productividad de fibra (ADT/ha/año), principalmente en sitios donde el desempeño de especies puras se ve limitado. En los últimos 5 años CMPC Chile ha plantado un promedio cercano a 12.000 ha de eucalipto por año, con una distribución promedio entre especies de 37% para *E. globulus*, 62% para *E. nitens* y un 1% de híbridos. Actualmente el material híbrido operacional consiste principalmente en clones de *E. nitens* x *E. globulus*, en adelante *EnxEgg*, sin embargo el programa genético de híbrido ha avanzado en el desarrollo de poblaciones más avanzadas de esta variedad, al igual que en el desarrollo de otras variedades multiespecíficas más complejas.

El presente capítulo tiene como objetivo entregar antecedentes generales del programa clonal híbrido de eucalipto de CMPC Chile y resultados relevantes de información capturada durante varias temporadas en parámetros de cruzas, y crecimiento volumétrico de variedades híbridas entre *E. nitens* y *E. globulus*. Consecuentemente, en él se evalúan y discuten los resultados de las etapas de cruzamiento y calidad de la semilla de seis años de cruzas de las variedades híbridas F1 entre *E. nitens* y *E. globulus*, sus retrocruzas y además de una craza híbrida intraespecífica de *E. bicostata* con *E. globulus*. Así mismo, se presentan los resultados de crecimiento a los 4 años de ensayos clonales en tres condiciones de sitios, para las mismas variedades híbridas. Con la presentación de estos resultados se busca entregar antecedentes referenciales altamente valiosos y elementos de discusión asociadas a la selección de especies y variedades híbridas de alto potencial de productividad en sitios de Chile.

ANTECEDENTES DEL PROGRAMA HÍBRIDO CMPC

La hibridación en programas de mejoramiento genético persigue la generación de nuevos genotipos, en los cuales puedan fijarse características de interés de las especies progenitoras, tales como resistencia al frío, propiedades de la madera (densidad básica), crecimiento (forma y volumen) o capacidad de enraizamiento (Volker *et al.*, 2008).

En el caso del género *Eucalyptus*, este contempla un gran número de especies, con más de 700 especies y subespecies definidas morfológicamente y establecidas en un amplio rango geográfico (Silva *et al.*, 2012). Muchas de las especies presentan características individuales altamente deseables, como son sus niveles de adaptabilidad y las aplicaciones industriales de sus propiedades biológicas.

El género *Eucalyptus* presenta flores hermafroditas, un sistema de cruzamientos mixtos y polinización por insectos, correspondiendo a un género que es propenso a fenómenos de hibridación (Barbour *et al.*, 2006). El desarrollo de cruzas interespecíficas dentro del género, ha posibilitado el desarrollo de híbridos capaces de manifestar ganancias genéticas simultáneas para atributos deseables pertenecientes a los progenitores. Esto sumado al fenómeno de heterosis o vigor híbrido, donde la progenie presenta rendimientos superiores al generado por sus progenitores, constituyen las bases biológicas de la generación de individuos con rendimientos superiores.

Hasta el momento no existen bases teóricas consistentes que permitan predecir las formas de transmisión de características de padres a hijos en cruzas híbridas interespecíficas.

Así, si bien existe la tendencia a transmitir las características de la madera en forma proporcional desde padre y madre a su progenie, no existe un patrón de heredabilidad claro en rasgos de viabilidad de la semilla, crecimiento y adaptación (Volker, 2002).

Para muchos programas de mejora genética de eucalipto en el mundo, la hibridación interespecífica ha constituido la forma más rápida y eficiente de obtener altas ganancias genéticas en atributos de interés industrial; mientras que la clonación representa la forma más rápida y eficiente de incorporar estas ganancias a las plantaciones y procesos industriales.

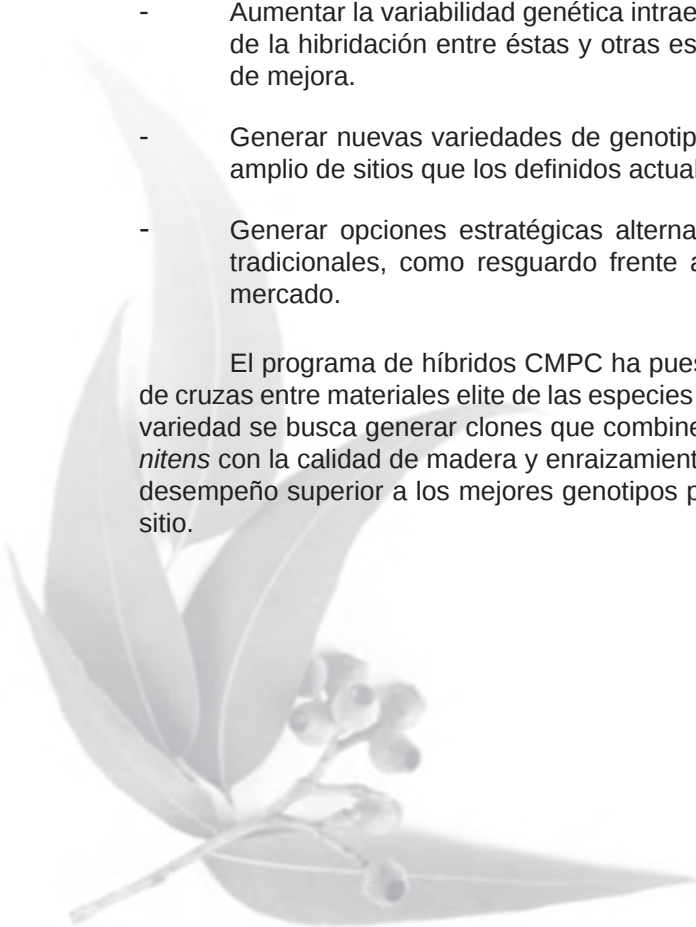
En general el programa de híbridos de CMPC ha seguido un enfoque probabilístico, donde la posibilidad de encontrar clones híbridos superiores radica en la capacidad del programa para generar y probar una gran cantidad de genotipos a partir de las especies de interés ya reconocidas, además de la incorporación de especies de características complementarias.

El programa de híbridos de CMPC tiene como objetivo general producir variedades con mayor rendimiento, mejor adaptabilidad y homogeneidad que genotipos puros. Operativamente, el programa busca mantener 3 o más clones híbridos de ADT/ha/año igual o superior a los mejores genotipos puros de *E. nitens* y *E. globulus*, en cada condición de sitio.

Algunos objetivos específicos del programa de híbrido son:

- Aumentar la variabilidad genética intraespecífica de *E. globulus* y *E. nitens* por medio de la hibridación entre éstas y otras especies de interés que aporten a los objetivos de mejora.
- Generar nuevas variedades de genotipos de *Eucalyptus* adaptados a un rango más amplio de sitios que los definidos actualmente para *E. globulus* y *E. nitens*.
- Generar opciones estratégicas alternativas y de mayor plasticidad a las especies tradicionales, como resguardo frente a plagas, enfermedades y oportunidades de mercado.

El programa de híbridos CMPC ha puesto un gran énfasis en el desarrollo de clones de cruza entre materiales elite de las especies *E. nitens* y *E. globulus* (Figura N° 1). Con esta variedad se busca generar clones que combinen el alto crecimiento y tolerancia al frío de *E. nitens* con la calidad de madera y enraizamiento de *E. globulus*, logrando variedades con un desempeño superior a los mejores genotipos puros de cada especie pura, por condición de sitio.



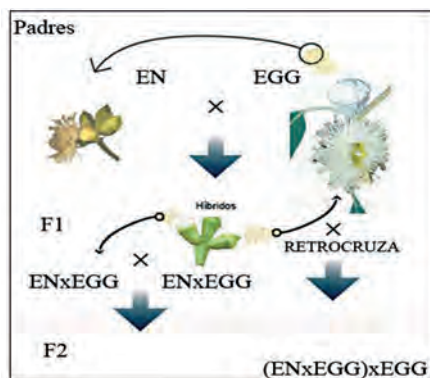


Figura N° 1

ESQUEMA GENERACIONES HÍBRIDAS VARIEDAD *E. nitens* POR *E. globulus*

Los híbridos de primera generación entre dos especies son denominados F1, en esta etapa es prioritario lograr una gran cantidad de cruza F1 EnxEgg, de modo de aumentar la posibilidad de encontrar clones de buen enraizamiento. No obstante, no existe ninguna razón genética para creer que a través de híbridos F1, con contribuciones de 50 a 50% desde los progenitores, se lograrán las mejores ganancias. Por lo mismo, retrocruzas o cruza introgresivas (cruza de genotipos híbridos con uno de los padres originales) pueden ser más apropiadas cuando se busca dar mayor probabilidad de ocurrencia a características de uno de los padres. Este es el caso de retrocruzas de $(EnxEgg) \times Egg$, (75% Egg y 25% En), donde se busca aumentar la capacidad de enraizamiento y dar mayor énfasis a las propiedades de la madera en un híbrido que ya presenta una alta tasa de crecimiento y tolerancia al frío. Como notación escrita, en una cruce híbrida $(A \times B)$, A se refiere a la madre y B al padre o donante de polen.

Una vez que se logran buenos híbridos F1 es posible pasar a la segunda generación de híbridos F2 al cruzar genotipos F1 no emparentados. Actualmente se han desarrollado cruza F2 que se han representado en ensayos de campo, aún no evaluados. Sin embargo, los esfuerzos se han centrado en el desarrollo de híbridos F1 y retrocruzas. El material para el desarrollo de estas cruza F1, ha sido en su mayoría las mejores familias de *E. nitens* de procedencia Nueva Gales del Sur y Victoria Central como madres, y polen de clones operacionales de Egg de buen enraizamiento y alto rendimiento pulpable como padres.

CRUZAMIENTOS HÍBRIDOS Y PARAMETROS SEMINALES

Material y Método

En el presente capítulo se entregan resultados de cruzamientos controlados, respecto de la calidad de las semilla de las variedades híbridas F1 $EnxEgg$, y de las retrocruzas $(EnxEgg) \times Egg$ y $Egg \times (EnxEgg)$. Es importante destacar que los antecedentes aquí descritos corresponden a resultados obtenidos de los programas operacionales de cruce, por lo tanto no existe un balance ni diseños experimentales en variables de interés tales como clones usados como madres, fuentes de polen, número de aislamientos, y otros. Así, en cada variedad híbrida se realizó un número variable de aislamientos por año, en que se utilizaron igualmente un número variables de familia. El resumen del número de familias y aislamientos realizadas se describe en el Cuadro N° 1.

Los cruzamientos controlados de todas las variedades híbridas y *E. nitens* fueron realizados bajo el método tradicional de aislación con bolsa. Por su parte, en *E. globulus* las cruza se realizaron bajo la técnica OSP (*one stop polination*) en la que se realiza un retiro del anillo estaminal post antesis (Harbard *et al.*, 2000). Estas cruza fueron realizadas en distintos huertos semilleros clonales de CMPC sobre madres seleccionadas por sus atributos de productividad floral y por su *ranking* en volumen y densidad para las madres de *E. nitens* y *E. globulus*.

Cuadro N° 1
CRUZAS HÍBRIDAS POR VARIEDAD Y AÑO DE CRUZAMIENTO

Especie	Item	Años						Total
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	
(EnxEgg)xEgg	Familias	8	4	19	12	34	1	78
	Flores aisladas	229	173	732	434	1.270	54	2.893
EgbxEgg	Familias		10		4	10	23	47
	Flores aisladas		466		83	500	1.259	2.308
Eggx(EnxEgg)	Familias	8	2					10
	Flores aisladas	424	66					490
EnxEgg	Familias	20	51	12	27	15		125
	Flores aisladas	220	1.017	448	636	285		2.606
Total general	Familias	36	67	31	43	59	24	260
	Flores aisladas	873	1.721	1.180	1.154	2.055	1.313	8.297

En: *Eucalyptus nitens*

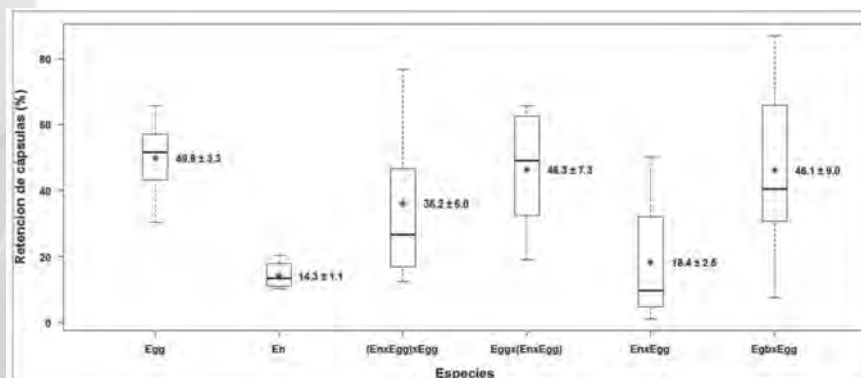
Egg: *Eucalyptus globulus ssp globulus*

Egb: *Eucalyptus globulus ssp bicostata*

Resultados y Discusión

- Retención de Capsulas

Los resultados de la retención o *set* de capsulas, expresado como el número de capsulas cosechadas dividido por el número total de flores polinizadas se presenta en la Figura N° 2. Así mismo, los resultados de la prueba de comparación de medias entre especies para las variables retención de cápsulas se presentan en el Cuadro N° 2.



El boxplot considera la variación de las madres cruzadas en las distintas temporadas de crusa

Figura N° 2
RETENCIÓN DE CAPSULAS DE LAS DISTINTAS VARIEDADES HÍBRIDAS Y PURAS DE EUCALIPTO

Cuadro N° 2
RESULTADOS DE LA PRUEBA DE COMPARACIÓN MULTIPLE DE MEDIAS PARA EL EFECTO DE LAS
ESPECIES, SOBRE LOS RASGOS RETENCION DE CAPSULAS, SEMILLA POR CAPSULA Y CAPACIDAD
GERMINATIVA. (p=0,05)

Especie	Características		
	Retención de Cápsula (%)	Semillas/Cápsula (N°)	Capacidad Germinativa (%)
Egg	49.8 a	30.5 a	79.7 a
(EnxEgg)xEgg	36.2 a	4.0 c	51.7 b
EgbxEgg	46.1 a	4.2 c	49.2 b
Eggx(EnxEgg)	46.3 a	15.5 b	59.5 b
EnxEgg	18.4 b	1.6 c	32.5 c
En	14.3 b	2.5 c	60.0 b

De los resultados obtenidos se desprende que la variedad o especie con mayor retención de capsulas fue *E. globulus* con un 49,8%, seguida muy de cerca por las variedades *Eggx(EnxEgg)* y *EgbxEgg*, con un 46,3% y 46,15% de retención, respectivamente. Así mismo, la retrocruza (EnxEgg)xEgg obtuvo un 36,2% de retención mientras que la variedad F1 *EnxEgg* y *E. nitens* lograron una retención considerablemente menor, 18,4% y 14,3%, respectivamente.

Los resultados de la prueba de media para la retención de cápsulas confirma la existencia de diferencias significativas entre especies y permite confirmar la existencia de dos grupos, grupo "a" compuesto por *Egg* y las variedades con mayor cercanía híbrida a esta especie *Eggx(EnxEgg)*, *EgbxEgg* y *(EnxEgg)xEgg* y altos niveles de retención; y un segundo grupo, identificado como "b", compuesto por *En* y el híbrido F1 *EnxEgg*. Las altas tasas de retención observada en el grupo "a" son esperadas, considerando las mayores similitudes anatómicas y compatibilidad de estructuras florales de la especie madre con el polen paternal. Algunos autores sostienen que flores más grandes pueden tener mejor retención lo cual concuerda con las variedades o combinaciones que en este estudio lograron mayor éxito (Potts y Dungey, 2004).

Por su parte, los resultados para *E. nitens* y el híbrido F1 en general son bajos y menores a algunos valores encontrados en la literatura. Al respecto, Tibbits, 1989, en un estudio de polinización controlada de *E. nitens*, indica valores de 45% de retención para cruza controladas puras y 23% para cruza *EnxEgg*.

Volker, 2002 menciona valores promedio de retención de capsulas de 61% para *EggxEgg*, 22% para *Egg* autocruza, 23% para *EnxEgg*, 29% para *EnxEn* y 10% para *En* autocruza.

Son varios los autores que describen un efecto maternal en la tasa de retención de cápsulas, al igual que en el número de semillas por cápsula en eucalipto (Tibbits, 1989; Volker 2002). Así, es posible encontrar madres con buen set al ser cruzadas con una amplia variedad de pólenes y otras con mal set independiente del polen con que se les cruce.

Esta variación es evidente en la Figura N° 2, donde se aprecia, en especial en las variedades híbridas, una alta variación entre madres. Teniendo esto en consideración y haciendo una revisión más detallada de la variación del set a través de las madres, se observa que para la variedad F1, de las 45 madres cruzadas, 7 presentaron un set mayor al 40%.

Es importante mencionar que en la colección de cruzas híbridas evaluadas en este estudio no se hizo una selección de madres bajo sus meritos de cruzabilidad, sino más bien de acuerdo a su oferta de yemas florales en la temporada.

Actualmente en CMPC el programa de cruzas híbridas, especialmente en las variedades F1 y retrocruzas, considera parámetros de retención y cruzabilidad al momento de seleccionar las madres, esto junto a una buena selección y mantención del polen y un manejo de precisión del huerto de cruzas, ha permitido aumentar considerablemente los sets de cruzas y con ello mejorar la eficiencia y costos del programa de híbridos.

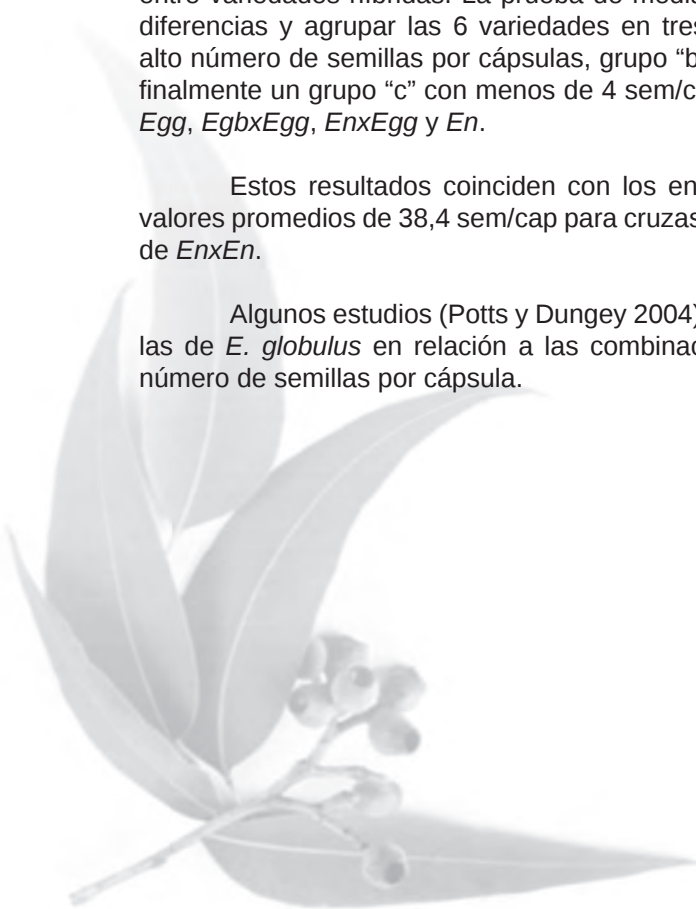
- Semillas por Capsula

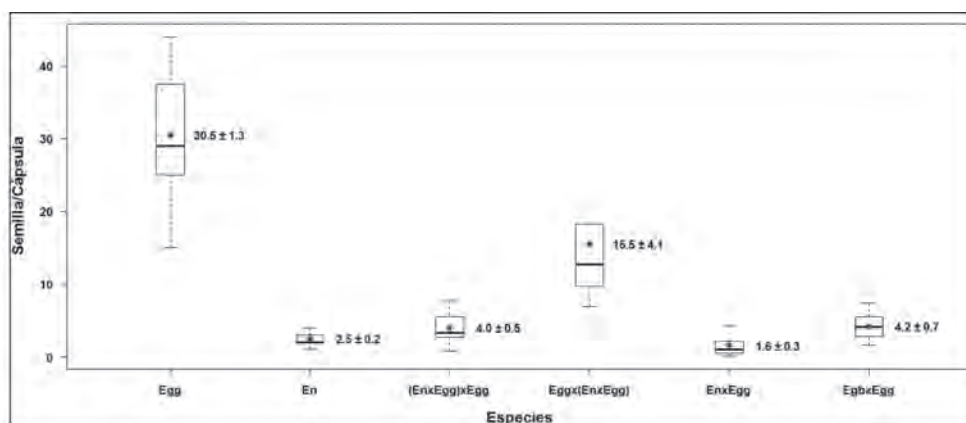
Los resultados de productividad de fruto, expresados como semillas por cápsula (sem/cap), se presentan en la Figura N° 3. Así mismo, los resultados de la prueba de comparación de medias entre especies para semillas por cápsula se presentan en el Cuadro N° 2.

De la Figura N° 3 se puede desprender que existe una alta variación de este parámetro entre variedades híbridas. La prueba de medias permite confirmar la significancia de estas diferencias y agrupar las 6 variedades en tres grupos: grupo “a” compuesto por *Egg* con alto número de semillas por cápsulas, grupo “b” compuesto por la variedad *Eggx(EnxEgg)* y finalmente un grupo “c” con menos de 4 sem/cap conformado por las variedades (*EnxEgg*)x *Egg*, *EgbxEgg*, *EnxEgg* y *En*.

Estos resultados coinciden con los entregados por Volker (2002), donde presenta valores promedios de 38,4 sem/cap para cruzas *EggxEgg*; 3,7 para *EnxEgg* y 6,4 para cruzas de *EnxEn*.

Algunos estudios (Potts y Dungey 2004) relacionan las flores de mayor tamaño, como las de *E. globulus* en relación a las combinaciones híbridas con *E. nitens*, con un mayor número de semillas por cápsula.





El *boxplot* considera la variación de las madres cruzadas en las distintas temporadas de cruce.

Figura N° 3
NÚMERO DE SEMILLAS POR CAPSULA
PARA DISTINTAS VARIEDADES HÍBRIDAS Y PURAS DE EUCALIPTO

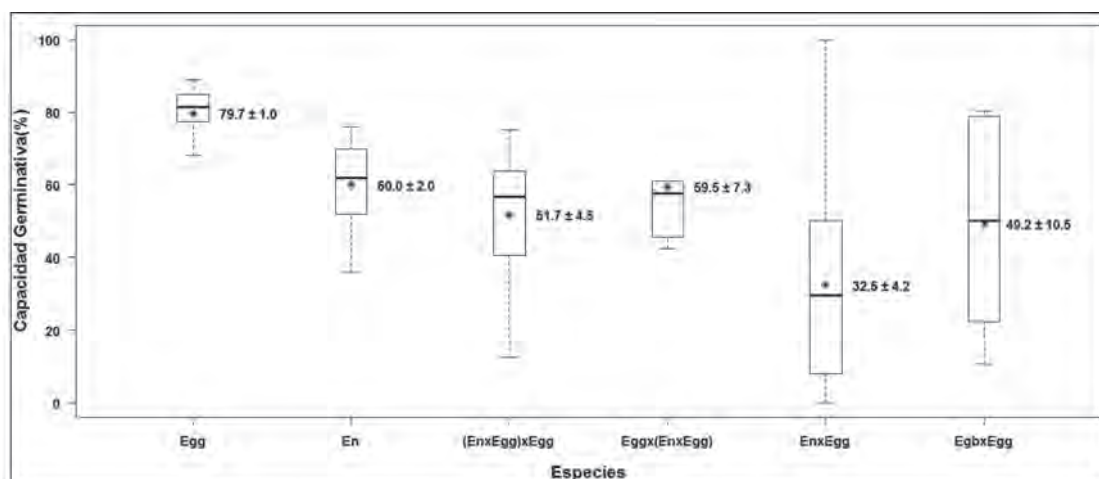
- Capacidad Germinativa

Los resultados de la capacidad germinativa (CG), expresada como el valor porcentual de la razón entre el número de semillas germinadas y el total de semillas viables sembradas, se presentan en la Figura N° 4. Los resultados de la prueba de comparación de medias entre especies para el rasgo Capacidad Germinativa se presentan en el Cuadro N° 2.

Los resultados denotan una importante variación en la capacidad germinativa, con diferencias significativas entre *Egg*, la variedad F1 *EnxEgg* y un tercer grupo compuesto por las variedades restantes. Con la excepción de *Egg* que presentó una buena capacidad germinativa, todas las otras variedades presentaron valores moderados, siendo la variedad F1 *EnxEgg* la de menor tasa de germinación, 32,5%.

Es importante señalar que la germinación se realizó bajo dos protocolos de tratamientos pregerminativos desarrollados para *Egg* y *En*. Así, la variedad F1 *EnxEgg* fue tratada bajo el protocolo de *En*, mientras que las otras variedades híbridas fueron tratadas bajo el protocolo de *Egg*. La diferencia entre ambos protocolos es básicamente el mayor tiempo de remojo de la semilla de *En* (48 horas) en una solución de ácido giberélico a 300 ppm.

Otros autores mencionan cruces de F1 *En x Egg* con valores de germinación entre 48 y 60% (Potts y Dungey, 2004). Para el caso aquí descrito existe mucha variabilidad entre las distintas combinaciones de madres y padres.



El boxplot considera la variación de las madres en las distintas temporadas de cruce

Figura N° 4
CAPACIDAD GERMINATIVA EXPRESADA PORCENTUALMENTE
PARA DISTINTAS VARIEDADES HÍBRIDAS Y PURAS DE EUCALIPTO

EVALUACIÓN DE CRECIMIENTO EN ENSAYOS CLONALES

Material y Método

Un eslabón de gran importancia en la estrategia de selección de clones híbridos de CMPC corresponde a los ensayos clonales T1. El objetivo del ensayo T1 consiste en hacer selección rápida de una gran cantidad de clones candidatos.

El ensayo T1 presenta un diseño de un árbol por parcela, de 20 réplicas y establecido en una serie de 4 a 8 sitios, dependiendo de las variedades evaluadas. Una vez evaluados los ensayos T1 y selectos los mejores clones, estos candidatos son propagados y llevados a un ensayo de validación de estructura de bloques y muy bien replicados.

Los ensayos evaluados en el presente trabajo corresponden a tres ensayos T1, los que fueron establecidos en suelos de arcilla con riego, arcilla seco y granítico de baja altura. La información detallada de los ensayos evaluados se presenta en el Cuadro N° 3.

La medición normal de estos ensayos se realiza a los 2 y 4 años. Con la medición de los 4 años es posible evaluar, además del volumen, la densidad de la madera de los clones candidatos a través del pilodyn. Este instrumento permite medir la resistencia a la penetración, variable medida en mm y moderadamente correlacionada con la densidad básica de la madera.

Si bien el pilodyn no entrega la densidad real, su buena correlación con la variable, permite hacer un *ranking* de los clones en función de la densidad.

Cuadro N° 3
INFORMACION GENERAL DE ENSAYOS CLONALES EVALUADOS

Ítem	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
Año plantación	2006	2006	2006
Tipo suelo	Arcilla con Riego	Arcilla seco	Granítico
Altitud (msnm)	200	220	100
Comuna	Mulchén	Mulchén	Nacimiento
Predio	Alicahue	Casas Quemadas	Santa Adriana
Precipitación anual (mm)	1200 - 1500	1200 - 1500	1200 - 1500
Diseño	STP	STP	STP
Repeticiones	20	20	20
Tratamientos	47	233	123
Controles	12	12	13
Arboles ensayo	1680	5280	3200
Espaciamiento (m)	2 x 3,5	2 x 3,5	2 x 3,5
Superficie (ha)	1,2	3,7	2,2
Fecha plantación (mes)	17 Nov.	24 Oct.	20 Oct.
Fertilización (g/planta NPK)	150	150	150
Preparación suelo	Casilla manual	Casilla manual	Casilla manual

En el presente trabajo se presentan y discuten los resultados de la medición a los 4 años de volumen y pilodyn para las variedades *En*, *Egg*, *EnxEgg* y *(EnxEgg)xEgg*. El volumen individual se obtuvo a través de dos funciones de volumen desarrolladas por Forestal Mininco SA. La función de volumen de *E. globulus* fue usada para cubicar las variedades *Egg* y la retrocruza, mientras que la función de volumen de *E. nitens* fue utilizada para la cubicación de *En* y el Híbrido F1.

Con los datos de volumen y pilodyn se generó la variable denominada Índice de Fibra (IF), la que corresponde al producto del volumen por el inverso del pilodyn. Este índice representa un indicador de la productividad de fibra de cada clon y permite realizar un *ranking* de alta precisión y bajo costo.

Finalmente, tanto el volumen como el índice de fibra se presentan en términos de ganancias relativas porcentuales respecto a la media de cada réplica. Así, esta transformación de las variables volumen y el índice de fibra permiten estimar la superioridad promedio de cada clon respecto al promedio de todos los clones del ensayo.

Resultados y Discusión

- Resultados para Arcilla con Riego

Los resultados de volumen e índice de fibra se presentan en términos de ganancias relativas porcentuales del volumen (GR-Vol) y del índice de fibra (GR-IF), ordenados de mayor a menor en función del ranking de la GR-Vol (Figura N° 5).

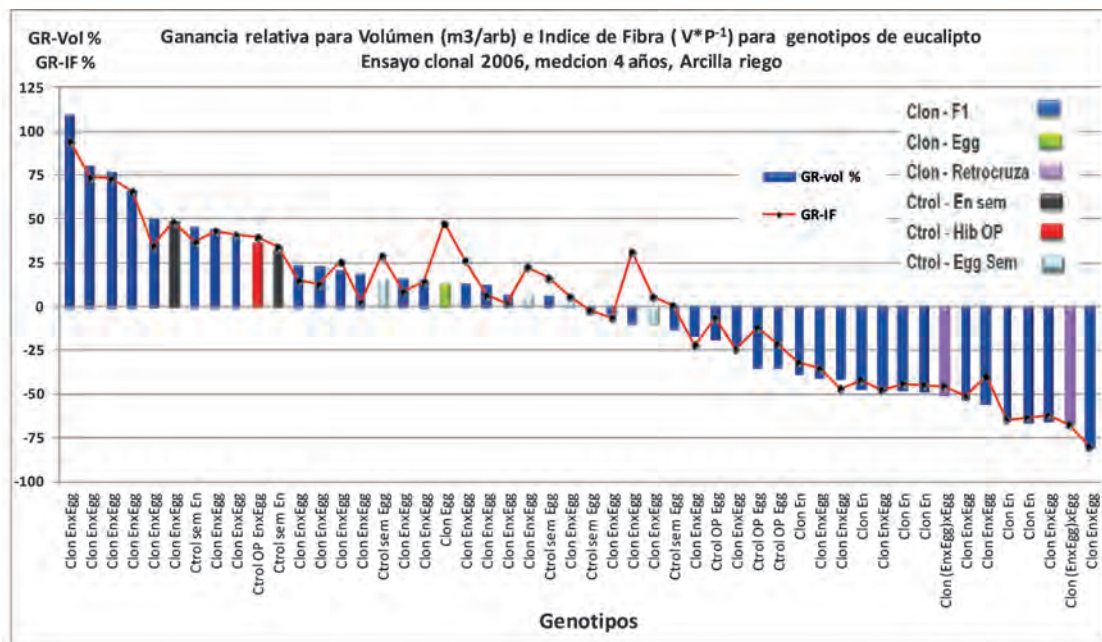


Figura N° 5
GANANCIA RELATIVA EN VOLUMEN E INDICE DE FIBRA
PARA LOS MEJORES 50 GENOTIPOS DEL RANKING DE VOLUMEN
ENSAYO ARCILLA RIEGO

Las barras del gráfico han sido coloreadas según la variedad, donde Clon-F1 (azul) representan todos los clones candidatos de la variedad *EnxEgg*. Por su parte, los controles también han sido agrupados según su tipo, Ctrol-En (negro) corresponden a los genotipos control de *E. nitens* propagados por semilla, Ctrol-Hib OP (rojo) identifica a los controles de clones híbridos que se usan operacionalmente. Esta nomenclatura es la misma en los gráficos presentados para los tres ensayos evaluados.

En la Figura N° 5 se puede observar que alrededor del 50% de los genotipos evaluados presentaron una GR-Vol positiva. Así mismo, se aprecia que existen 5 clones (10% del total) de la variedad F1 que presentan una GR-Vol superior al 50% y están por encima del mejor control, en este caso un control de *E. nitens*, lo que les otorga el potencial de selección para ser llevados al ensayo de validación posterior.

Por otra parte, a través de la curva de GR-IF se puede observar que tanto los mejores como los peores clones en volumen y prácticamente en el mismo orden fueron los mejores y peores del *ranking* por su índice de fibra, lo que refleja una alta correlación de este índice con los valores extremos de volumen.

Por el contrario, se observa una menor correspondencia entre el *ranking* de las dos variables en los genotipos con GR-Vol cercanos a cero. Un ejemplo claro de esto se presenta en el único clon de *Egg* (barra color verde) el cual presenta una GR-Vol de 13% y una GR-IF de 48%.

Resultados para Arcilla sin Riego

Los resultados para el ensayo establecido en suelo arcilloso sin riego se observan en la Figura N° 6.

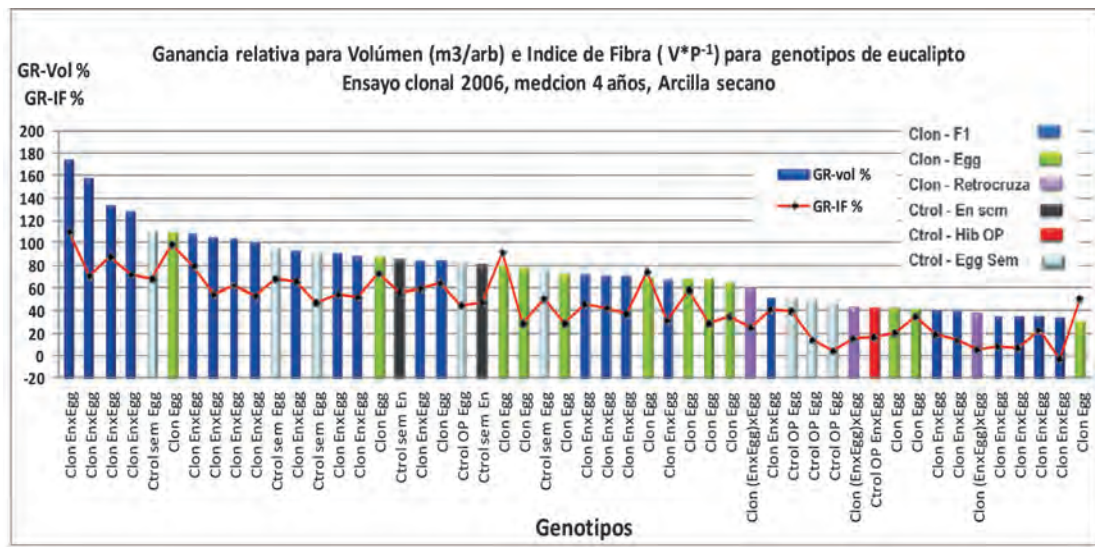


Figura N° 6
GANANCIA RELATIVA EN VOLUMEN E INDICE DE FIBRA
PARA LOS MEJORES 50 GENOTIPOS DEL RANKING DE VOLUMEN
ENSAYO ARCILLA SECAO

De los 245 genotipos presentes en este ensayo, solo 137 fueron medidos con pilodyn, de ellos 11 corresponden a controles y los restantes 126 al mejor 54% de clones en su *ranking* volumétrico. Los análisis de GR-Vol y GR-IF se realizaron en el sub-conjunto de 137 genotipos.

Del análisis de los resultados se desprende que 61 clones candidatos (48% del total) presentaron GR-Vol positivas. Así mismo, la gran amplitud de las GR-Vol (173% a -70%) denota una alta variabilidad del volumen entre clones.

De la Figura N° 6 se desprende que el mejor control corresponde a un genotipo de *Egg* de semilla, con un 108% de GR-Vol y un 70% en GR-IF, lo cual es esperable ya que en suelos de arcilla en el secoano *E. globulus* tiene en general un buen desempeño.

En términos de clones candidatos, existen 4 clones *EnxEgg* que superan al mejor control, seguidos por un clon candidato de *Egg* que presenta una alta GR-IF.

Así mismo, se puede afirmar que existen 36 genotipos con GR-Vol mayor al 50%, de ellos 28 son clones candidatos, de los cuales 17 corresponden a clones F1, 10 a *Egg* y uno a retrocruza.

Estos 28 candidatos (12% del total presente en el ensayo) constituyen materiales de alto potencial y califican para ser llevados a la serie de ensayos de validación.

Resultados para Suelo Granítico

De los 136 genotipos presentes en este ensayo, solo 110 fueron medidos con pilodyn y conforman el *subset* de datos sobre el cual se realizó el análisis de GR-Vol y GR-IF aquí presentado. Los resultados para el ensayo establecido en un suelo de granítico se observan en la Figura N° 7.

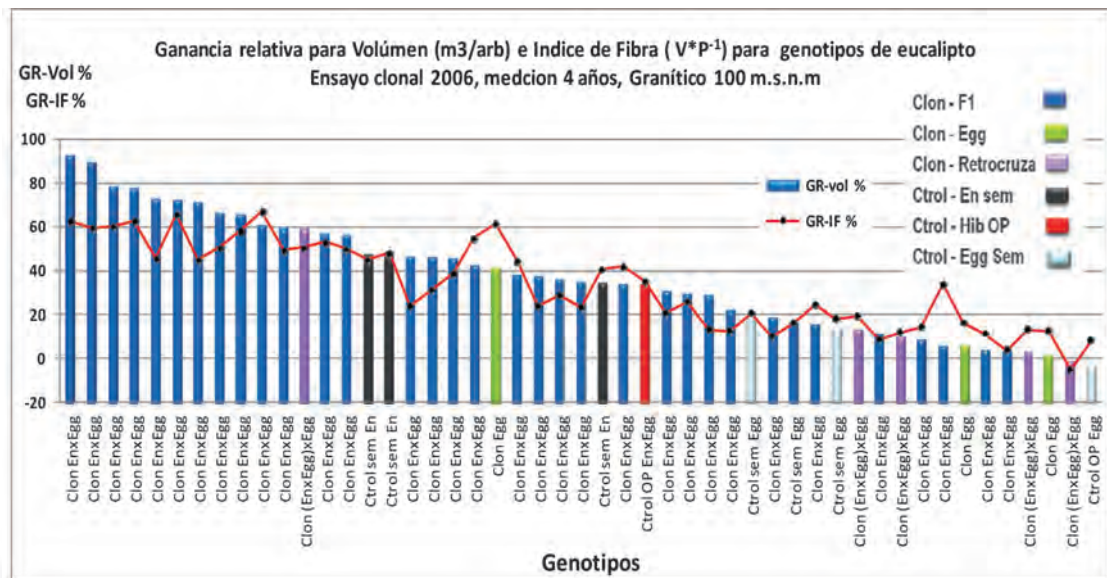


Figura N° 9.7
GANANCIA RELATIVA EN VOLUMEN E INDICE DE FIBRA
PARA LOS MEJORES 50 GENOTIPOS DEL RANKING DE VOLUMEN
ENSAYO SUELO GRANITICO

Al revisar los datos evaluados se observa que 47 genotipos (42%) presentaron GR-Vol positivas. El material control de mejor desempeño en este sitio fue *E. nitens*, que alcanzó un 47% de GR-Vol y un 44% en GR-IF. Respecto de los clones candidatos, de los 110 clones evaluados en el ensayo, 19 presentaron una GR-Vol mayor al 40%. De ellos un clon corresponde a una retrocruza, un clon a *Egg* y 17 a la variedad *EnxEgg*. Es interesante constatar como la mayor densidad de este clon de *Egg* le otorga también un alto valor de GR-IF (61%), el que resulta superior respecto a muchos de los clones mejor posicionados en el *ranking* de GR-Vol.

Estos antecedentes, si bien no son extrapolables a otras condiciones y materiales genéticos, constituyen información referencial útil para otros programas de cruza híbrida y ponen en perspectiva el alto potencial de productividad de clones híbridos de estas variedades, en suelos y sitios de alta importancia para Chile y países con similitudes climáticas.

CONCLUSIONES

La evaluación de la retención de cápsulas o *set* manifiesta la existencia de dos grupos de variedades; uno compuesto por *Egg* y las variedades con mayor cercanía híbrida a esta

especie *Eggx(EnxEgg)*, *EgbxEgg* y *(EnxEgg)xEgg*, los que manifiestan altos niveles de retención, y otro grupo compuesto por *E. nitens* y el híbrido F1 *EnxEgg*, con menores tasas de retención.

Para la variable semillas por cápsula también se observó variaciones significativas entre variedades, siendo nuevamente *Egg* la especie con mejor desempeño, con una media de 30,1 sem/cap, seguido nuevamente por la variedad *Eggx(EnxEgg)* con 15,5 sem/cap. Las variedades restantes presentaron valores menores a 4,2 sem/cap.

Para la capacidad germinativa los resultados denotan una variación significativa entre variedades con un alto desempeño para *Egg* (80%) y moderado para el resto de las variedades.

El registrar y conocer a nivel de variedades, madres y familias de los atributos de retención de cápsulas, productividad del fruto y capacidad germinativa, entre otros, es elemental y de alto impacto en la eficiencia y éxito de un programa de cruza híbridas. En la medida que se logra un mejor manejo de estas variables se reducen los costos del programa, se acelera la evaluación de familias híbridas élite y se aumenta la probabilidad de seleccionar clones de alto desempeño.

La evaluación del desempeño de clones candidatos en ensayos T1 en tres condiciones de sitio reflejó una alta adaptabilidad y potencial de selección de clones de la variedad *EnxEgg* en las tres condiciones. Por su parte, los clones de *Egg* también presentaron un excelente desempeño en arcilla sin riego.

REFERENCIAS

Barbour, R.C.; Potts, B.M.; Vaillancourt, R.E. and Tibbits, W.N. 2006. Gene flow between introduced and native *Eucalyptus* species: flowering asynchrony as a barrier to F₁ hybridisation between exotic *E. nitens* and native Tasmanian *Symphyomyrtus* species. *Forest Ecology and Management* 226, 9–21.

Harbard, J.L.; Griffin, R.; Espejo, J.E.; Centurion, C. and Russell, J. 2000. 'One stop pollination' a new technology developed by Shell Forestry technology unit. In: Dungey HS, Dieters MJ, Nikles DG (eds) *Proceedings of QFRI/CRC-SPF symposium: hybrid breeding and genetics of forest trees*. Department of Primary

Potts, B.M. and Dungey, H.S. 2004. Interspecific hybridization of *Eucalyptus*: key issues for breeders and geneticists. *New For* 27:115–138.

Silva, J.C.; Potts, B.M. and Tilyard, P. 2012. Epistasis causes outbreeding depression in *Eucalypt* hybrids. *Tree Genet. Genomes* 8: 249–265.

Tibbits, W.N. 1989. Controlled pollination studies with Shinning Gum (*Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden). *Forestry* 62, 111-126

Volker, P.W. 2002. Quantitative genetics of *Eucalyptus globulus*, *E.nitens* and their F₁ hybrid. PhD thesis, University of Tasmania.

Volker, P.W.; Potts, B.M. and Borralho, N.M.G. 2008. Genetic parameters of intra- and inter-specific hybrids of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*. *Tree Genet. Genomes* 4:445–460

Wright, J.W. 1962. Genetics of forest tree improvement. Rome. FAO Forestry and Forest Products Studies No. 16. 399 p.

14. SELECCIÓN CLONAL Y OTRAS ALTERNATIVAS PARA MEJORAR LA TOLERANCIA AL FRÍO DE *Eucalyptus globulus*

Braulio Gutiérrez C.¹

INTRODUCCIÓN

En Chile, *Eucalyptus globulus* Labill. es una de las especies forestales de mayor importancia económica, situación que obedece principalmente a su rápido crecimiento y a la calidad de su madera, especialmente para la fabricación de pulpa de fibra corta.

Sumado al rápido crecimiento y buena forma que exhibe *E. globulus* en Chile, la especie tiene la capacidad de adaptarse a un rango relativamente amplio de sitios. No obstante, existen extensas superficies que exhiben restricciones que limitan su desarrollo, particularmente zonas con incidencia de heladas, donde la baja tolerancia al frío de la especie ha limitado la expansión de sus plantaciones hacia el Sur y hacia la Precordillera Andina. Incluso en sectores del Valle Central se han producido desastrosas pérdidas de plantaciones, en zonas afectadas por heladas.

Reconociendo la vulnerabilidad de *E. globulus* a las bajas temperaturas y atendiendo a las demandas por disponer de material genético adaptado a condiciones de frío, capaz de exhibir rendimientos productivos rentables bajo tal restricción de sitio, se han buscado alternativas de producción que permitan superar esta limitante. Al respecto, existen diferentes opciones de solución, las que van desde el cambio de especie hasta la transformación genética, pasando por procesos de aclimatación gradual de las plantas al frío y soluciones derivadas de la aplicación de tecnologías tradicionales de mejoramiento genético, entre ellas la selección y clonación de genotipos tolerantes y la hibridación de *E. globulus* con otras especies mejor adaptadas al frío.

En tal escenario, el presente capítulo entrega una revisión respecto al comportamiento de *E. globulus* ante las bajas temperaturas y describe y analiza alternativas para sobrellevar las limitaciones impuestas por el frío al cultivo de esta especie.

EL *Eucalyptus globulus* Y LAS BAJAS TEMPERATURAS

El área de distribución natural de *E. globulus*, en Australia, presenta dos tipos de clima, un clima marítimo en Tasmania y otro subtropical en el sur de Victoria. Ambos se caracterizan por una distribución relativamente uniforme de precipitaciones a lo largo del año, lo que junto a temperaturas moderadas determina una mínima incidencia de déficit hídrico y heladas (Toval, 2004). En Tasmania por ejemplo, si bien se producen algunas nevazones, la temperatura del suelo no baja de 0°C. Por el contrario, como especie exótica, *E. globulus* se ha difundido extensamente por el mundo, enfrentando distintas condiciones ambientales, siendo su sensibilidad al frío uno de los principales factores que limita su expansión (Keller *et al.*, 2004).

¹ Ingeniero Forestal. Licenciado en Ciencias Forestales Universidad de Chile. bgutierr@infor.cl

Efectivamente, aunque *E. globulus* ha demostrado una gran adaptabilidad climática, la mayoría de las introducciones exitosas se han producido en zonas de clima templado, sin abundancia de meses secos, precipitaciones anuales cercanas a los 900 mm y temperaturas mínimas no inferiores a -7°C. Particularmente, por tratarse de una especie que presenta yemas desnudas y que no exhibe un período de receso vegetativo en invierno, resulta especialmente sensible a las bajas temperaturas (Kuminsky y Scarascia-Mugnozza, 1994).

En Chile, la mayoría de las plantaciones de *E. globulus* sufren algún grado de daño por heladas, los que varían desde efectos leves, que no comprometen el crecimiento ni la forma de los árboles, hasta daños severos que provocan la muerte de los mismos (Droppelmann et al., 2001).

Las plantas de esta especie son sensibles al frío y las heladas, pudiendo morir al enfrentar temperaturas inferiores a -5°C. Santos (1997) señala que los daños se producen cuando la temperatura desciende de -3°C, mientras que otros autores mencionan que existen procedencias de Tasmania que pueden soportar temperaturas de hasta -8°C y mantener un buen crecimiento (Prado et al., 1994).

El valor absoluto de temperatura al cual se produce el daño es variable y depende de varios factores. Prado et al. (1994) mencionan que además del valor de la temperatura se debe considerar la velocidad de descenso de la misma, la duración del periodo frío bajo un determinado umbral, la amplitud térmica diaria, la temperatura del suelo, la humedad relativa del aire, la velocidad del viento, la presencia o ausencia de nieve y el estado vegetativo de las plantas al momento de ocurrir el episodio de frío. Por su parte, Santos (1997) agrega otros factores, entre los cuales menciona el contenido de humedad del suelo, el tamaño y la condición del árbol, el clima local y la época del año en que se produce la helada.

La capacidad de tolerar bajas temperaturas aumenta con la edad de los árboles, siendo el follaje juvenil más sensible que el adulto; también varía entre órganos y tejidos y en función del estado fisiológico de las plantas, siendo los tejidos suculentos, con mayor contenido de agua, más susceptibles que los tejidos lignificados (Parra y Canala-Echeverría, 1994).

Adicionalmente, a lo largo del año las plantas experimentan una variación estacional en su capacidad de tolerar frío, *endureciéndose* en forma gradual durante el otoño para alcanzar la máxima resistencia en invierno y revertir este proceso en primavera, para llegar a una tolerancia mínima durante el verano. Así se pueden observar diferencias de hasta 8°C entre las temperaturas mínimas que pueden tolerar en invierno y verano (Prado et al., 1994).

El comportamiento de *E. globulus* ante las bajas temperaturas ha sido estudiado por diversos investigadores, tanto en condiciones de campo como en condiciones controladas de laboratorio.

Droppelmann et al. (2001) evalúan la tolerancia al frío en un ensayo de progenies de *E. globulus* de un año de edad, formado por 77 familias de polinización abierta, durante un año en que hubo más de 20 heladas invernales y en el que se registraron temperaturas mínimas de hasta -9,5°C. Concluyen que el 92% de los árboles presentan daño por frío, pero observan también una gran variabilidad en la capacidad de la especie para tolerar esta condición, detectando familias particularmente frío-tolerantes. Concluyen además que el

carácter tolerancia al frío es altamente heredable, estimando un valor de heredabilidad de 0,56.

Nixon (1983) también evaluó la tolerancia al frío en ensayos de campo de 15 especies de eucaliptos, establecidos en tres sitios de Sudáfrica. El análisis se efectuó a los 11 meses de edad, utilizando una escala de daño subjetiva, que varió desde cero (árboles sin daño) hasta cuatro (árboles muertos o severamente dañados). En los tres sitios observó que *E. globulus* y sus subespecies fueron de los más afectados, detectando mortalidad total en algunos ensayos y supervivencia del orden de 0,2% en otros. Por el contrario, en las mismas condiciones, especies como *E. dalrympleana*, *E. macarthurii* y *E. viminalis* mostraron ser muy resistentes al frío. Coincidentemente, Darrow (1983) también señala la pérdida total de ensayos de *E. globulus* como consecuencia del frío, en otra área de Sudáfrica distinta a las consideradas por Nixon (1983).

Existen numerosas referencias bibliográficas respecto a evaluaciones de daño por frío, provocado por heladas naturales, en ensayos de terreno de distintas especies de eucaliptos (Eldrige *et al.*, 1983). No obstante estas condiciones distan de las ideales para fines de investigación, por cuanto son altamente dependientes de las características meteorológicas específicas de los años involucrados en el estudio, así como de las condiciones específicas del sitio (Nixon, 1983). En consecuencia, se han efectuado estudios de evaluación de resistencia al frío bajo condiciones controladas en cámaras o cuartos climatizados.

En el caso de *E. globulus*, Prado *et al.* (1994) evaluaron la resistencia al frío de plantas de vivero de 36 procedencias y 121 familias representativas de gran parte del área de distribución natural de la especie en Australia, utilizando una cámara de frío de temperatura controlable. Tras simular las heladas y evaluar el daño provocado en el follaje, concluyen que entre -1 y -4 °C se producen daños que comprometen alrededor del 30% del follaje de las plantas, aspecto que retrasa su crecimiento pero no amenaza su supervivencia; a -6°C el daño resulta severo y afecta en distinto grado a todas las procedencias y familias ensayadas; existen procedencias muy sensibles al frío, particularmente aquellas de las islas King y Cape Barren en el Estrecho de Bass, y otras más resistentes (Jeerelang y Flinders), no obstante no existe un patrón bien definido de resistencia al frío a nivel de procedencias, como tampoco una correlación adecuada entre esta y la altitud.

Para evitar someter plantas completas a bajas temperaturas, Eldrige *et al.* (1983) desarrollaron un método no destructivo para analizar la resistencia al frío de los eucaliptos, basado en la conductividad eléctrica de discos foliares de 6 mm de diámetro, sometidos a temperaturas de congelamiento generadas por un baño de glicoletileno, utilizado para aplicar los tratamientos de frío y controlar la temperatura.

Bara *et al.* (1994) utilizan un método equivalente al anterior para evaluar la resistencia al frío de 240 familias de *E. globulus* en plantas de una temporada de crecimiento en vivero. Para tales efectos simulan heladas de -2, -3, -4, -5, -6 y -7°C en discos foliares de 9 mm de diámetro, mediante un baño térmico automatizado de glicoletileno que ejecuta un descenso programado y controlado de la temperatura. Posteriormente, miden la conductividad eléctrica y la expresan como un porcentaje de la conductividad máxima, correspondiente a aquella medida en el mismo disco después de someterlo a una temperatura de destrucción celular (-18°C). Mientras mayor es el porcentaje de conductividad mayor es el nivel de daño experimentado por las células del disco expuesto a la helada simulada. Tal procedimiento

permite demostrar que existe variación estadísticamente significativa en la capacidad de tolerar frío entre la distintas familias de *E. globulus*. Los resultados también coinciden con los de Prado *et al.* (1994) en términos de que no se detecta una relación clara entre origen geográfico del material vegetal ensayado y frío-tolerancia.

Técnicas bioeléctricas, relacionadas con evaluaciones de potencial osmótico, contenido relativo de agua e impedancia eléctrica también han sido utilizadas para estudiar los mecanismos involucrados en la respuesta de los eucaliptos ante las bajas temperaturas (Glerum, 1980; Serrano y Pardos, 1994)

En *E. globulus*, las técnicas anteriores se han utilizado para evaluar el efecto de distintos esquemas de endurecimiento de plantas de vivero, sometidas artificialmente a heladas de hasta -10°C en una cámara refrigerada (Serrano y Pardos, 1994). De tales estudios se desprende que plantas jóvenes de *E. globulus* son capaces de expresar algún grado de endurecimiento después de ser sometidas a tratamientos de aclimatación consistentes en exposición a temperaturas relativamente bajas (6 a -2°C) durante 7 noches consecutivas, resultando mayor el grado de endurecimiento mientras más baja es la temperatura de aclimatación dentro del rango ensayado. También se observa una diferencia entre los testigos y las plantas endurecidas de hasta 3,1°C en la temperatura a que se manifiestan los daños. Junto con aumentar el endurecimiento se produce también un incremento de la impedancia eléctrica y una disminución del potencial osmótico y del contenido relativo de agua, aún así, atendiendo a la gran variabilidad en los estados fisiológicos de las plantas individuales, estos parámetros no han constituido predictores seguros para efectuar selección precoz por resistencia al frío.

Enfoques similares para desarrollar procedimientos de selección precoz para tolerancia al frío también han sido documentados por Marien (1979) y Pardos y Pita (1989), aunque frecuentemente se ha observado ausencia de una correlación adecuada entre los resultados de estas selecciones y la posterior tolerancia exhibida por las plantas cuando son establecidas en terreno.

A pesar de la literatura existente en relación al proceso de adaptación o aclimatación al frío de las plantas, aún no se conocen a cabalidad los mecanismos involucrados en tal proceso, sugiriéndose por lo mismo la adopción de distintas estrategias prácticas para sobrellevar esta limitación en el desarrollo de *E. globulus* (Gutiérrez *et al.*, 2001; 2002).

ALTERNATIVAS PARA SOBRELLEVAR LAS LIMITACIONES IMPUESTAS POR EL FRÍO AL CULTIVO DE *E. globulus*

Dadas la vulnerabilidad de *E. globulus* a las bajas temperaturas y las demandas de las empresas de pulpa por contar con material genético adaptado a condiciones de frío para plantaciones productivas y rentables bajo esta restricción de sitio, se han buscado alternativas de producción que permitan superar esta limitante. Existen distintas alternativas para contribuir en alguna medida a mitigar los efectos del frío en el cultivo de *E. globulus*. Estas abarcan desde el cambio de especie hasta el uso de organismos transgénicos, pasando por procesos de aclimatación gradual de las plantas al frío y soluciones derivadas de la aplicación de tecnologías tradicionales de mejoramiento genético. Entre estas últimas se destacan la selección y clonación de genotipos tolerantes y la hibridación de *E. globulus* con otras especies tolerantes al frío (Gutiérrez *et al.*, 2001).

Las particularidades propias de cada opción, en términos de su disponibilidad actual y expectativas futuras; su efecto sobre el aprovechamiento industrial de la especie; el tiempo requerido para obtener resultados operacionales; los costos asociados a su implementación y la oportunidad en que ellas pueden ser utilizadas, constituyen los atributos fundamentales para comparar y analizar los distintos enfoques sugeridos para sobrellevar las limitaciones que el frío impone al cultivo de *E. globulus*. Una comparación en términos relativos de estas características, para las opciones tecnológicas; reemplazo de especie, endurecimiento, hibridación, clonación y transgenia se resume en el Cuadro N° 1.

El análisis de las características reflejadas en el cuadro mencionado sugiere que la combinación de más de una de las opciones constituye un enfoque apropiado para complementar sus ventajas y obtener los mejores resultados, en término de minimizar el efecto del frío sobre las plantas a cultivar. También sugiere que las opciones identificadas pueden ser clasificadas en términos de su oportunidad de utilización en alternativas actuales y potenciales.

Cuadro N° 1
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS IDENTIFICADAS PARA SOBRELLEVAR
LAS LIMITACIONES IMPUESTAS POR EL FRÍO AL
CULTIVO DE *E. globulus*.

Atributos Relevantes	Opciones Tecnológicas				
	Cambio Especie	Endurecimiento Plantas	Hibridación	Selección y Clonación	Transformación Genética
Disponibilidad de la tecnología	Disponible	Disponible	Disponible	Disponible	En desarrollo
Efecto sobre aprovechamiento industrial	Reduce rendimiento pulpable	No afecta	Reduce rendimiento pulpable	No afecta	No afecta
Plazo para resultados operacionales	Corto	Corto	Mediano	Mediano	Largo
Costos involucrados	Bajos	Bajos	Medios	Medios	Altos
Expectativas futuras	Variables	Bajas	Medias	Medias	Altas

Cambio de Especie

El enfoque más simple para evitar el daño causado por el frío en las plantaciones de *E. globulus* sugiere evitar su plantación en zonas afectadas por heladas y utilizar en su reemplazo otras especies mejor adaptadas a esas condiciones. En este sentido, una de las especies reconocidas por presentar una de las mejores combinaciones de resistencia al frío y velocidad de crecimiento es *E. nitens* (Lembke, 1977; Marquestaut *et al.*, 1977; McKimm y Flinn, 1979; FAO, 1981; Schönauf y Purnell, 1987; Johnson y Wilcox, 1989).

En Chile, de las múltiples especies de *Eucalyptus* ensayadas desde los años 60 en los programas de introducción de especies ejecutados por INFOR, *Eucalyptus nitens* surgió como una de las más promisorias en cuanto a resistencia al frío y tasa de crecimiento. Lo anterior incidió importantemente en que se promoviera como una especie alternativa para ser plantada en aquellas zonas en que las bajas temperaturas restringían el desarrollo de *E. globulus* (Prado *et al.*, 1986).

Utilizar especies de eucalipto distintas a *E. globulus* en aquellas zonas donde esta se ve afectada por las bajas temperaturas es una opción práctica para evitar los daños en las plantaciones. Es también una opción disponible en la actualidad y que durante la década de los 90 constituyó uno de los principales argumentos para promover en forma significativa la forestación con *E. nitens*. No obstante, siendo una opción válida, en la práctica no contribuye a mejorar el desempeño de *E. globulus*.

Endurecimiento de Plantas

El acondicionamiento gradual de las plantas a condiciones de baja temperatura es otro enfoque para reducir el daño por heladas. Estudios conducidos sobre la mayoría de las especies más comunes de *Eucalyptus* coinciden en señalar que la capacidad de estas plantas para resistir el frío está relacionada con la exposición gradual a temperaturas moderadamente bajas (Harwood, 1980; Kuminsky y Scarascia-Mugnozza, 1994). En el caso de *E. globulus*, Serrano y Pardos (1994) señalan que plantas endurecidas mediante exposición a temperaturas bajas (-2 a 6°C) durante una semana, pueden tolerar temperaturas 3°C más frías que plantas equivalentes sin endurecer. Análogamente, Paton (1983) menciona que plantas de *E. viminalis* sometidas durante dos días a una temperatura de 2°C, alcanzan un grado de endurecimiento que les permite soportar temperaturas de hasta -6,5°C, la cual resulta mortal en plantas sin este acondicionamiento.

El endurecimiento o aclimatación de las plantas a las bajas temperaturas es una tecnología disponible. Su aplicación se verifica como una medida adicional de manejo de las plantas en vivero, las que mediante exposición a temperaturas relativamente bajas, sobre 0°, obtienen la capacidad de tolerar efecto de las heladas en mejor forma que las plantas no endurecidas.

El efecto de esta práctica es de poca duración, pero tiene el mérito de manifestarse precisamente durante la primera temporada de crecimiento de las plantas en terreno, de modo que la tolerancia adicional a las bajas temperaturas se expresa en el estadio de desarrollo en que son más sensibles al frío.

La naturaleza de esta alternativa la constituye en un adecuado complemento adicional para mejorar la tolerancia al frío de plantas generadas por cualquiera de las alternativas que se describen en los puntos siguientes.

Hibridación de *E. globulus* con Especies Tolerantes al Frío

Los cruzamientos híbridos de *E. globulus* con especies resistentes al frío (Ej. *E. gunnii* y *E. nitens*), teóricamente pueden generar una progenie que combine las características de *E. globulus* con la resistencia al frío de la especie complementaria (INFOR, 2000; Gutiérrez et al., 2001).

Abundantes estudios se han efectuado en el área de la hibridación de especies de *Eucalyptus* (Cauvin et al., 1986; Martin, 1989; Tibbits et al., 1991; Dungey et al., 1993; Espejo et al., 1994; Volker, 1995). De acuerdo con Shelbourne (2000) la factibilidad de desarrollar un programa operativo de hibridación está determinada por las características biológicas de las especies involucradas, la viabilidad de la descendencia híbrida y la capacidad de esta última para ser propagada vegetativamente.

En efecto, como consecuencia de la variabilidad de las progenies híbridas, se hace necesario efectuar rigurosas selecciones antes de identificar algún individuo que combine apropiadamente las características favorables de cada progenitor. Por otra parte, este genotipo excepcional solo podrá masificarse en la medida que se propague vegetativamente, vale decir en la medida que se pueda materializar la clonación operacional del individuo híbrido identificado. Por lo mismo, el desarrollo de la tecnología de hibridación debe ser complementado con el desarrollo de protocolos operacionales de clonación (Gutiérrez *et al.*, 2001).

En el caso de *E. globulus*, reconociendo su importancia para la industria de celulosa y las limitaciones que el frío le impone, Tilyard *et al.* (2000) señalan que existe un especial interés por usar híbridos F1 de *E. nitens* x *E. globulus*, pero que el desarrollo de estos se ve limitado, tanto por la dificultad para producir semilla híbrida a gran escala como por la escasa capacidad de propagarlos clonalmente.

En la práctica se observa que el desempeño de las progenies híbridas es muy variable, presentando una tendencia a expresar características intermedias entre las especies progenitoras puras, situación que conlleva un sacrificio de las características deseables de cada padre. Tal situación ha sido confirmada para la resistencia al frío de híbridos F1 de *E. globulus* x *E. gunnii* (Manson y Potts, 1995), así como para la capacidad de enraizamiento de híbridos de *E. camaldulensis* x *E. globulus* (Awad y Gutiérrez, 1997).

Las situaciones extremas en el comportamiento de los individuos híbridos, correspondientes en el mejor caso a heterosis (vigor híbrido), o en el peor de ellos a características anómalas o aberraciones, son mucho menos frecuentes (Espejo *et al.*, 1994). Aún así, en cruzamientos híbridos entre *E. nitens* y *E. globulus*, Tilyard *et al.* (2000) mencionan que la F1 exhibe en terreno un desempeño deficiente, con altas tasas de mortalidad, alta incidencia de anomalías y bajo crecimiento, señalando que no fue posible identificar ninguna familia de estos cruces que tuviera un desempeño adecuado.

En forma similar, Volker (1995) compara el crecimiento de progenies híbridas y puras de *E. nitens* y *E. globulus* de cuatro años de edad, concluyendo que en el caso de los híbridos la distribución de frecuencias del diámetro presenta una mayor concentración en las clases inferiores, que la de las especies puras. Por el contrario, experiencias desarrolladas en Chile por importantes empresas forestales indican que la hibridación ofrece interesantes perspectivas en este sentido y que individuos derivados de cruzamientos entre *E. nitens* y *E. globulus* exhiben un adecuado y promisorio desarrollo en terreno. Detalle de tales antecedentes pueden ser apreciados en el Capítulo 13.

El estado actual de la tecnología de polinización controlada permite generar híbridos entre distintas especies de eucaliptos, existiendo de acuerdo a los antecedentes reflejados en la revisión bibliográfica, abundantes ejemplos de su aplicación. Es por lo mismo, una opción actualmente disponible para contribuir a otorgar tolerancia al frío a *E. globulus*, mediante su cruzamiento con otras especies que manifiesten una mayor tolerancia a este factor. El aprovechamiento de esta opción tecnológica pasa por usar especies sexualmente compatibles, evaluar el desempeño de los individuos híbridos resultantes e identificar a los escasos individuos de interés, para posteriormente tener la capacidad de propagarlos vegetativamente.

Atendiendo a la gran variabilidad de las progenies híbridas, su aprovechamiento práctico necesariamente demanda la capacidad de poder propagar vegetativamente a los individuos de interés. En este sentido, la tecnología de hibridación debe complementarse con la de clonación.

Por otra parte, el comportamiento intermedio exhibido por los híbridos en relación a sus progenitores, conlleva un sacrificio de las características de interés de las especies puras. Así por ejemplo, los híbridos *E. nitens* x *E. globulus* no serán tan resistente al frío como *E. nitens*, ni exhibirán rendimientos pulpables tan deseables como los de *E. globulus*. Al respecto, una acuciosa selección de los progenitores, asegurándose que ellos expresen ventajosamente los rasgos que se pretende transferir, contribuirá a mejorar el desempeño del híbrido obtenido.

En tal sentido, la selección y clonación de individuos de *E. globulus* tolerantes al frío es una tecnología complementaria con la de hibridación, por cuanto al mejorar las características de interés de las especies puras se obtiene un impacto directo en el resultado del híbrido, permitiendo por ejemplo aumentar la participación genética de *E. globulus*, al hacer retrocruzas entre la F1 y el padre más deseable (*E. globulus*). Por lo mismo, clones de *E. globulus* seleccionados específicamente por combinar una manifiesta tolerancia al frío, con caracteres productivos deseables, constituyen los individuos ideales para ser considerados en la planificación de un programa de cruzamientos híbridos con una especie complementaria que contribuya con tolerancia adicional a las bajas temperaturas.

Selección y Clonación de Individuos Tolerantes al Frío

La masificación, a través de mecanismos de clonación, de genotipos seleccionados por combinar tolerancia al frío con otras características productivas de interés, parece una forma más directa que la hibridación (y también complementaria a esta) para sobrellevar las limitaciones que le imponen las bajas temperaturas a *E. globulus*. (INFOR, 2000; Gutiérrez *et al.*, 2001)

Esta alternativa se sustenta en la variabilidad intraespecífica exhibida por *E. globulus* en relación a la tolerancia al frío, la que ha sido demostrada en diversos estudios (Bara *et al.*, 1994; Prado *et al.*, 1994; Droppelmann *et al.*, 2001) y permite la existencia de individuos de características sobresalientes, en plantaciones que crecen en zonas con alta incidencia de heladas (INFOR, 2000).

Todos los métodos de clonación son aplicables en alguna medida a los eucaliptos, pero el que concentra la mayor atención es el enraizamiento de estacas, debido fundamentalmente al gran número de copias que se puede obtener a partir de un ortet o árbol seleccionado, a su menor costo con relación a otras técnicas (micropropagación) y por requerir menos laboriosidad y evitar los problemas de incompatibilidad de los injertos (Ipinza y Gutiérrez, 1992; Gutiérrez *et al.*, 1994; Gutiérrez, 1995; Ipinza y Gutiérrez, 1998).

El uso de las técnicas de enraizamiento ha generado resultados impresionantes y muy conocidos en eucaliptos tropicales. También se han establecido programas operativos de producción de plantas con eucaliptos de zonas templadas, entre los cuales se destacan los desarrollados en España y Portugal con *E. globulus*. En estos programas el éxito obtenido obedece a una estrategia sencilla, basada en una alta intensidad de selección para la capacidad de enraizamiento (Gutiérrez *et al.*, 2001).

La selección y clonación de individuos de *E. globulus* tolerantes al frío es un enfoque práctico y directo para mejorar el desempeño de plantaciones de esta especie en sitios afectados por bajas temperaturas. Entre sus ventajas se reconoce que es un método más directo que la hibridación, y a la vez complementario a ella, para mejorar la tolerancia al frío. Exhibe además la ventaja adicional de no sacrificar las características deseables de *E. globulus* al hibridarlo con otra especie que aporte frío-resistencia.

Tecnológicamente corresponde a una estrategia simple que hace uso de herramientas tradicionales y disponibles de mejoramiento genético y propagación, aspecto que lo hace mucho más accesible y aplicable que otras tecnologías de vanguardia, aún en desarrollo y con limitaciones para su masificación, como es el caso de la transformación genética.

Permite complementarlo con tratamientos de endurecimiento de plantas, para mejorar aún más el desempeño de las plantaciones en terreno durante el primer año de su establecimiento.

Como inconveniente se identifica el hecho de que la especie no es fácil de propagar vegetativamente y que sólo una pequeña proporción de los individuos selectos exhibe una capacidad rizogénica compatible con la clonación operacional mediante enraizamiento de estacas. Aún así, constituye el método adoptado por las principales empresas forestales de Chile para mejorar la tolerancia al frío de *E. globulus* y se ha materializado operacionalmente mediante la implementación de un proyecto FONDEF² que permitió seleccionar y evaluar la capacidad rizogénica de más de 1.500 árboles plus identificados en plantaciones operacionales en zonas con alta incidencia de heladas, para posteriormente establecer en ensayos clonales a aquellos 26 individuos con mejor aptitud para ser clonados operacionalmente.

El enfoque propuesto de selección y clonación de individuos tolerantes al frío ha demostrado ser exitoso en otros programas operacionales de clonación con objetivos distintos. Al respecto, la referencia más directa corresponde a los trabajos efectuados en España, donde mediante la selección del orden de 1.744 individuos de *E. globulus* tolerantes a condiciones de sequía, permitió identificar 16 clones enraizables con los cuales se configuró un programa operacional de clonación para generar material vegetativo para el establecimiento de plantaciones comerciales (Cañas, 1990).

Transformación Genética

Un enfoque moderno para enfrentar el problema de la susceptibilidad al frío de *E. globulus* sugiere el uso de la tecnología de transformación genética.

Griffith *et al.* (1992) y Edwards *et al.* (1995) señalan que a las especies sensibles al frío se les puede conferir resistencia adicional, mediante la incorporación de aquellos genes que codifican para la síntesis de proteínas anticongelantes en las especies adaptadas a bajas temperaturas.

² FONDEF D00I1036 "Captura de Genotipos para el Desarrollo de una Raza de *Eucalyptus globulus* Tolerante al Frío". Ejecutado entre el año 2001 y 2006, por el Instituto Forestal, Bioforest S.A., Cooperativa de Mejoramiento Genético Forestal y las instituciones asociadas a esa Cooperativa: Bosques Arauco S.A.; Bosques Cautín S.A.; CONAF; Forestal Celco S.A.; Forestal Los Lagos S.A.; Forestal Tornagaleones S.A. y Forestal Valdivia S.A.

Keller *et al.* (2004) plantean que la identificación de los genes involucrados en las respuestas bioquímicas y fisiológicas de las plantas ante las bajas temperaturas, así como la determinación de los patrones de expresión de estos genes y un mayor conocimiento de sus funciones, entregarán las bases para una estrategia efectiva de mejoramiento de la resistencia a factores de estrés.

En el mismo sentido, estudios efectuados por Zúñiga (2000) en *Deschampsia antarctica* indican que esta planta es capaz de producir una gran cantidad de hidratos de carbono, principalmente sacarosa y polímeros de fructosa, que ayudan a disminuir su temperatura de congelamiento, de modo que aunque la temperatura sea muy baja, el tejido no se congela. Al respecto, el autor indica que si se identifican los genes involucrados en este proceso, se pueden transferir mediante tecnologías de transformación genética, a especies de interés económico para mejorar su frío-tolerancia.

Coincidiendo con lo anterior, Griffin (1995) señala que la tolerancia al frío en eucaliptos es un carácter particularmente apropiado para mejorarlo mediante procedimientos de ingeniería genética. De igual forma, Edwards *et al.* (1995) mencionan a este rasgo junto con la tolerancia a herbicidas y la reducción de lignina como los tres principales caracteres que satisfacen criterios científicos y económicos que sugieren introducirlos o modificarlos mediante transgenie.

Algunos de los resultados más significativos de la transformación genética para mejorar la tolerancia al frío se han obtenido en plantas de *Arabidopsis thaliana* transgénicas y silvestres creciendo en un recipiente, congeladas a -10° C y luego devueltas a temperatura normal. Las plantas transgénicas se hacen resistentes al frío, en tanto las silvestres quedan completamente aniquiladas. Una respuesta semejante se obtiene cuando los genes CBF de *Arabidopsis* son incorporados en una especie relacionada como la canola (*Brassica spp*) (Somerville, 2002, *cit por* Figueroa, 2003). También se ha logrado la transformación estable de tejido embrionario de *Pinus radiata* mediante cepas de *Agrobacterium tumefaciens* utilizado como vector del gen CBF3 de *A. thaliana* (Gamboa *et al.*, 2003).

A pesar del claro potencial de la ingeniería genética para contribuir al mejoramiento genético de los árboles forestales, aún presenta algunos aspectos que deben ser depurados, de modo que su aplicación no es inmediata y el costo de su desarrollo es alto (Gutiérrez *et al.*, 2001). Además de las complejidades biológicas, propias de esta moderna tecnología, existen otros aspectos que han influido negativamente en su adopción. Entre ellos Chandler (1995) y Griffin (1995) mencionan a la negociación de patentes y licencias; las regulaciones, o falta de ellas, para la evaluación y liberación de transgénicos; y la negativa percepción pública de los eventuales efectos ambientales de esta tecnología.

Al respecto, Balocchi y Valenzuela (2004) estiman que es solo cuestión de tiempo la superación de las limitaciones de carácter técnico y económico que restringen la adopción masiva de la transgenie. Reconocen como limitación principal a la incertidumbre respecto de su aceptación pública y postulan que será este último factor el que definirá el futuro de la tecnología de transformación genética en árboles forestales.

Análogamente, Strauss *et al.* (2004) analizan los resultados de 15 años de investigación en transformación genética de álamos, concluyendo que la transgenia es una herramienta extremadamente útil para la investigación en biotecnología y genómica funcional. Destacan

que la transformación de álamos es una tecnología confiable, donde la estabilidad de los rasgos transformados es muy alta; la variación somaclonal es marginal y manejable; y donde existen diversos métodos para desarrollar sistemas de esterilidad para evitar el escape de genes y mejorar la bioseguridad. Aún así, coinciden en que será materia de largo plazo la masificación de estos árboles, lo que además requerirá de una favorable disposición de entidades públicas y privadas para cooperar en el progreso y difusión de esta tecnología.

De acuerdo con los antecedentes presentados en el Cuadro N°1, este enfoque constituye una opción potencial para contribuir a mejorar la tolerancia al frío de *E. globulus*, pero su aplicación operacional no resulta inmediata.

Efectivamente, la tecnología de transformación genética en árboles forestales es una herramienta relativamente nueva. Los primeros ensayos de campo se efectuaron recién en 1988, ocasión en que se plantaron en Bélgica los primeros álamos transformados para resistir el efecto de herbicidas. En la actualidad existen un poco más de 200 ensayos y la única plantación conocida a escala comercial fue efectuada el año 2003 en China.

Por otra parte, el desarrollo de esta tecnología se concentra en relativamente pocos países. Según Strauss *et al.* (2004), el 64% de los ensayos se encuentra en Estados Unidos, y un 41% se concentra en 7 países europeos. Más aún, 11 instituciones son responsables de más del 75% de los ensayos existentes. Estos antecedentes son especialmente relevantes si se considera que uno de los obstáculos para el desarrollo de transgenia es el considerable costo que involucra el pago de licencias, y *royalties* a los titulares de las patentes asociadas a estos desarrollos.

La diversidad de géneros considerados en las pruebas de campo también es escasa, un 55% de ellas corresponden a *Populus* y un 15% a *Pinus*. El porcentaje restante está representado, en orden de participación, fundamentalmente por *Picea*, *Liquidambar*, *Juglans*, *Eucalyptus* y *Castanea*.

En la actualidad el número de caracteres modificados aún es restringido, siendo la tolerancia a herbicidas el rasgo más representado (31% de las pruebas de terreno). Este carácter más la resistencia a enfermedades e insectos, elementos de desarrollo reproductivo y modificación de la lignina concentran el 90% de las liberaciones experimentales de árboles transgénicos. Como hecho relevante debe destacarse que aún cuando se reconoce que esta tecnología puede ser de utilidad para mejorar la tolerancia al frío de *E. globulus*, no existe ningún ensayo reportado para evaluar esta característica.

Los antecedentes anteriores confirman que la modificación genética es una tecnología nueva y poco difundida. Aún así, es conocida por un amplio sector de la comunidad, donde crea posiciones muy divergentes. A nivel de opinión general, existe un conocimiento vago sobre el tema, normalmente sesgado por visiones sensacionalistas que la asocian a manipulaciones genéticas nocivas para la salud humana y el medioambiente. Por el contrario, una visión más objetiva permite reconocer en esta tecnología una herramienta de gran potencial, cuya aplicación en el sector forestal permitirá materializar importantes ventajas productivas, pero que aún requiere de investigación adicional para dilucidar dudas respecto a eventuales impactos no deseados.

Efectivamente, si bien la transgenie ofrece un gran potencial, aún presenta aspectos tanto científicos y biológicos como políticos, sociales y económicos, que deben ser depurados. Una de las consideraciones técnicas más relevantes dice relación con la estabilidad del rasgo transformado, es decir que el gen exógeno sea heredado a la descendencia y que se exprese en ella de forma estable. Al respecto, si bien el ADN incorporado se integra a un *locus* simple del genoma nuclear y se hereda en forma mendeliana, existen evidencias de la pérdida del fenotipo transformado durante la meiosis, así como irregularidades en la expresión del carácter en la línea de individuos transformados (INFOR, 2003).

En términos económicos, existen limitaciones para calcular el retorno de las inversiones en transformación genética de árboles forestales, derivadas de los costos de los *royalties* asociados con los genes y procesos protegidos por patentes. Como la mayoría de estas innovaciones pertenecen a compañías biotecnológicas, como Monsanto o ArborGen, y el material genético y los clones son propiedad de empresas forestales, existe la necesidad de crear consorcios entre ambas entidades para aplicar esta tecnología al mejor material genético de las empresas.

A su vez, los aspectos de política y regulación de la investigación y liberación de árboles transgénicos es un aspecto que aún debe ser resuelto para cada país y para cada esquema de certificación forestal. Así, de acuerdo con los estándares de certificación de FSC (*Forest Stewardship Council*), este sello no acepta la utilización de árboles genéticamente modificados por considerarlos incompatibles con el manejo forestal sustentable.

En Chile, la situación de los árboles transgénicos está en un estado aún más incipiente, siendo remota la posibilidad práctica de usar esta tecnología en el corto plazo para mejorar la tolerancia al frío de *E. globulus*. Existen, sin embargo, algunas iniciativas realizadas con *Pinus radiata* y *Eucalyptus* transgénicos, entre las que se destacan los trabajos de GENFOR orientados a la obtención de pinos resistentes a la polilla del brote (*Rhyacionia buoliana*), y las investigaciones de Royal Dutch/Shell en Chile y Uruguay para producir eucaliptos con un tipo diferente de lignina, con la finalidad de facilitar su remoción durante la fabricación de pulpa y papel. Por su parte, Forestal y Agrícola Monte Águila S.A., en 1999, efectuó pruebas de campo con 60 plantas de eucalipto tolerantes al herbicida glifosato, bajo la supervisión del SAG. Posteriormente, abandonó las pruebas señalando que no pretende continuar con los experimentos ni reemplazar sus plantaciones por eucaliptos transgénicos (INFOR, 2003).

En resumen, la situación de la tecnología de transformación genética para mejorar la tolerancia al frío de *E. globulus* corresponde a la de una herramienta con un gran potencial futuro, cuya aplicación no se verificaría en el corto plazo. Esto coincide con las conclusiones que se desprenden del artículo de Bitrán (2003), quien reconoce la necesidad de invertir en transgenia en Chile. En primera instancia a nivel experimental y exploratorio, mientras se liberan las barreras internacionales que limitan su uso, reconociendo que cualquier postergación involucraría un retraso en el desarrollo tecnológico de Chile. Este autor también destaca la necesidad de desarrollar un marco regulatorio que inspire confianza en todos los estamentos de la sociedad.

CONCLUSIONES

Eucalyptus globulus es una especie de gran importancia económica cuyo desarrollo se ve severamente afectado por las bajas temperaturas.

Se identifican diferentes estrategias para evitar o reducir el efecto del frío sobre las plantaciones de *E. globulus*. Sus efectos y aplicabilidad son variados, reconociéndose que la complementación de ellas representaría el enfoque más adecuado para mitigar el efecto del frío sobre la especie.

La hibridación de *E. globulus* con especies tolerantes al frío es una tecnología disponible para generar material genético tolerante al frío. Es menos directa que la selección y clonación de individuos frío-tolerantes de *E. globulus*, e involucra un sacrificio de las características deseables de cada progenitor. Aún así, es complementaria con el enfoque de clonación.

El endurecimiento de plantas mediante exposición gradual a bajas temperaturas, mejora su tolerancia al frío, resultando una medida complementaria de gran valor para mejorar el desempeño de las plantas durante su primera temporada en terreno.

Utilizar especies distintas a *E. globulus* en aquellos sitios donde el frío limita su desarrollo y supervivencia es una estrategia viable para reducir las pérdidas de productividad.

La transformación genética es una moderna herramienta biotecnológica, que exhibe un gran potencial para contribuir a mejorar la tolerancia al frío de *E. globulus*. Sin embargo, su estado de desarrollo y las restricciones para su uso sugieren que su aplicación a nivel operacional no se verificará en el corto plazo.

La selección y clonación de individuos tolerantes al frío es una opción válida para mejorar el desempeño de las plantaciones de *E. globulus* en áreas de baja temperatura. Su aplicación es más directa que la hibridación y además complementaria con ella. Los individuos selectos resultan progenitores ideales para programas de cruzamiento controlado, mientras que la experiencia en clonación resulta de utilidad para multiplicar los eventuales híbridos de interés.

REFERENCIAS

- Awad, G. y Gutiérrez, B., 1997. Evaluación de la Capacidad Rizogénica de Progenies Híbridas F1 de *Eucalyptus camaldulensis* x *E. globulus*. Chile Forestal N° 247.
- Balocchi, C. y Valenzuela, S., 2004. Introduction to GMO's and Biosafety in Forestry. In: Kellison, R.; Mc. Cord, S. and Gartland, K. (editors). Forest Biotechnology in Latin America. Proceedings from the Workshop Biotecnología Forestal. Global Biotechnology Forum. Concepción, Chile. 2-5, March 2004. Pp: 85-96.
- Bara, S.; Español, E.; Vega, G. y Rodríguez, E., 1994. Test of Frost Resistance of *Eucalyptus*. En: Pereira, J. y Pereira, H. (Editores). *Eucalyptus* for Biomass Production. Lisboa, Portugal. Pp: 155-167.
- Bitrán, E., 2003. Transgénicos en Chile: ¿Ser o no ser?. El Mercurio, 31 de marzo de 2003.
- Cañas, I., 1990. Selección Individual y Multiplicación Clonal de *Eucalyptus globulus* Labill. Jornadas Técnicas Forestales "Materiales Forestales de Reproducción en España". Huelva, España. 8 y 9 de febrero, 1990.
- Cauvin, B.; Potts, B. y Potts, W., 1986. *Eucalyptus*: Hybridation Artificielle-Barriers et Heredite des Caracteres. Annales de la Recherche Silvicoles, 1986. AFOCEL, Paris. Pp: 255-303.
- Chandler, S., 1995. Commercialization of Genetically Engineered Trees. En: Conference CRCTHF-IUFRO, Eucalypt plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Australia, 19-24 de febrero. Pp: 381-385.

Darrow, K., 1983. Provenance Studies of Frost-Resistant Eucalypts in South Africa. In: Proceedings of Colloque International Sur les *Eucalyptus* Résistants au Froid. Bordeaux, France. 26-30 septembre 1983. Pp: 448-468.

Droppelmann, F.; Balocchi, C.; Morales, E.; Arriagada, M. y Catalán, G., 2001. Evaluación Genética de la Tolerancia al Frío de Familias de Medios Hermanos de *Eucalyptus globulus*. En: Actas del Simposio Internacional IUFRO: Desarrollando el Eucalipto del Futuro. Valdivia, Chile. 10-15 de septiembre de 2001. CD.

Dungey, H.; Volker, P.; Potts, B. y Owen, J., 1993. Interespecific Hybridisation between *Eucalyptus nitens* and *E. globulus*: Preliminary Analysis of Early Growth and Frost Resistance. En: Proceedings of the 12° Meeting of Research Working Group 1 (Forest Genetic) of the Australian Forestry Council. Canberra, 15-18 February, 1993. Pp: 104-106.

Edwards, G.; Fish, N.; Fuell, M.; Keil, J.; Purse, J. y Wignall, T., 1995. Genetic Modifications of Eucalypts. Objectives Strategies and Progress. En: Conference CRCTHF-IUFRO, Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Australia, 19-24 de febrero 1995. Pp: 389-391.

Eldrige, K.; Owen, J.; Griffin, R. Y Harwood, C., 1983. Development of a Method for Assessing Frost Resistance of Eucalypts. In: Proceedings of Colloque International Sur les *Eucalyptus* Résistants au Froid. Bordeaux, France. 26-30 septembre 1983. Pp: 145-152.

Espejo, J.; England, N.; Rojas, P. y Griffin, R., 1994. Resultados de Primeras Temporadas de Hibridación en *Eucalyptus* spp. En: Barros, S.; Prado, J. y Alvear, C. (Editores). Actas del Simposio Los Eucaliptos en el Desarrollo Forestal de Chile. Pucón, Chile, 24 al 26 de noviembre de 1993. Santiago, Chile. Abril de 1994. Pp: 51-60.

FAO, 1981. Eucalypts for Planting. FAO Forestry Series N° 11. Rome, Italy. 677 p.

Figueroa, J., 2003. El "Switch" Molecular que Permitirá a los Cultivos Tolerar Heladas y Sequías. Revista Chile Riego N° 13. Enero 2003. http://www.chileriego.cl/revista/rev13/revista13_2.htm. Consulta 19.11.2004.

Gamboa C.; Engel, E.; Krauskopf, E.; Arce, P. y Valenzuela, P., 2003. Transformation of *Pinus radiata* with *Arabidopsis thaliana* CBF Genes, Santiago, Chile. XXVI Reunión Anual de la Sociedad de Bioquímica y Biología Molecular de Chile. Villa Alemana, Chile. 23-26 de Septiembre de 2003. http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0716976020030003000300015&script=sci_arttext&lng=es. Consulta 7.12.05.

Glerum, C., 1980. Electrical Impedance Techniques in Physiological Studies. N.Z. For. Sci. 10(1):196-207.

Griffin, A., 1995. Genetic Modification in *Eucalyptus* Breeding. Bridging the Gap Between the Laboratory and Plantation. En: Conference CRCTHF-IUFRO, Eucalypt plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Australia, 19-24 de febrero 1995. Pp: 398-402.

Griffith, M.; Ala, P.; Yang, D.; Hon, W. y Moffatt, B., 1992. Antifreeze Proteins Produced Endogenously in Winter Rye Leaves. Plant Physiol. 100:593-596.

Gutiérrez, B.; Ipinza, R. y Chung, P., 1994. Propagación Vegetativa y Silvicultura Clonal en Eucalipto. Ciencia e Investigación Forestal. Vol. 8 (1):139-175.

Gutiérrez, B., 1995. Consideraciones sobre la Fisiología y el Estado de Madurez en el Enraizamiento de Estacas de Especies Forestales. Ciencia e Investigación Forestal. Vol 9 (2): 261-277.

Gutiérrez, B. ; Molina, M. ; Balocchi, C. y Droppelmann, F., 2001. Desarrollo de una Raza Local de *Eucalyptus globulus* Tolerante al Frío en Chile. En: Actas del Simposio Internacional IUFRO, Desarrollando el Eucalipto del Futuro. Valdivia, Chile. 10-15 septiembre, 2001. CD.

Gutiérrez, B.; Balocchi, C. y Droppelmann, F., 2002. Estrategia y Avances para el Desarrollo de una Raza de *Eucalyptus globulus* Tolerante al Frío en Chile. En: Actas 1er Congreso Chileno de Ciencias Forestales. Santiago Chile. 23-25 de octubre, 2002. Facultad de Ciencias Forestales Universidad de Chile. Publicaciones Misceláneas Forestales N° 6. CD.

Harwood, C., 1980. Frost Resistance of Subalpine *Eucalyptus* Species. I. Experiments Using a Radiation Frost Room. Aust. Jour. Bot. 28: 587-599.

INFOR, 2000. Captura de Genotipos para el Desarrollo de una Raza de *Eucalyptus globulus* Tolerante al Frío. Documento de formulación proyecto FONDEF D00I1036. 8º. Concurso Nacional de Proyectos de Investigación y Desarrollo FONDEF 2000. Instituto Forestal. Concepción, Chile. 75 p.

INFOR, 2003. Implementación de Metodología de Transformación Genética en Especies de *Eucalyptus*. Documento de formulación proyecto. 11º Concurso Nacional de Proyectos de Investigación y Desarrollo FONDEF 2003. Instituto Forestal. Concepción, Chile. 97 p.

Ipinza, R. y Gutiérrez, B., 1992. Resultados Preliminares del Enraizamiento de Estaquillas de *Eucalyptus globulus* Tratadas con Altas Dosis de Ácido Indolbutírico. Ciencia e investigación Forestal. Vol. 6(1):61-79.

Ipinza, R. y Gutiérrez, B., 1998. La Multiplicación Clonal en el Mejoramiento Genético Forestal. En: Ipinza, R.; Gutiérrez, B. y Emhart, V. (Editores). Curso Mejora Genética Forestal Operativa. Valdivia, Chile, 16 al 21 de noviembre de 1998. Pp: 201-218.

Johnson, G. y Wilcox, M., 1989. Eucalypt Species Trials on Pumiceland. New Zealand Forestry 34(1):24-27.

Keller, G.; Ladouce, N.; Teulieres, C. and Marque, C., 2004. Expressions Profiles of 3000 *Eucalyptus* DNA under Cold, Osmotic or Salt Stress. En: *Eucalyptus* in a Changing World. International IUFRO Conference of the WP2.08.03 on Silviculture and Improvement of Eucalypts. Aveiro, Portugal. 11-15 october, 2004. CD.

Kuminsky, E. y Scarascia-Mugnozza, G., 1994. Biochemicals Modifications during Cold Hardening of *Eucalyptus* Clones. En: Pereira, J. y Pereira, H. (Editores). *Eucalyptus* for Biomass Production. Lisboa, Portugal. Pp: 143-154.

Lembke, C., 1977. N.Z. Forest Products Ltd. Turns to Eucalypts. Aust. For. Ind. Jour. 43(7): 26-31.

Manson, A. y Potts, B., 1995. Inheritance of Frost Resistance in F1 and Advanced Generations Hybrids of *Eucalyptus globulus* and *E. gunnii*. En: Conference CRCTHF-IUFRO, Eucalypt plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Australia, 19-24 de febrero 1995. Pp: 249-250.

Marien, J., 1979. La Selectione Juvenile des *Eucalyptus* pour leur Resistance au Froid. Annales de la Recherches Sylvicoles. AFOCEL, France. Pp: 224-253

Marquestaut, J.; Thibout, H. y Cauvin, B., 1977. Essai d'Introduction d'*Eucalyptus* dans le Midi de la France. Annales de la Recherche Sylvicole, AFOCEL.

Martin, B., 1989. The Benefits of Hibridisation: How do We Breed for Them?. En: Proceeding of the IUFRO Conference: "Breeding Tropical Trees: Population Structure and Genetic Improvement Strategies in Clonal and Seedling Forestry". Pp: 79-92.

Mc Kimm, R. y Flinn, D., 1979. Eucalypt Species, Site Preparation and Fertilizer Requirements for Reforestation of the Toorongo Plateaux in Central Victoria. Aust. For. 42(2):117-124.

Nixon, K., 1983. A Test of Fifteen *Eucalyptus* Species and Provenances for Frost Resistance in Natal. En: Proceedings of Colloque International sur les *Eucalyptus* Resistants au Froid. Bordeaux, France. 26-30 septembre 1983. Pp: 367-376.

Pardos, J. y Pita, P., 1989. Resistance aus Geles de Plants d'*Eucalyptus globulus*: Evaluation Avec des Techniques Bioelectriques. En: Les Estrategies de Selection Face aux Technologies Modernes. Versailles, France. 57 p.

Parra, P. y Canala-Echeverría, J., 1994. Resistencia al Frío de Procedencias y Familias de *Eucalyptus nitens* en Aysén. En: Barros, S.; Prado, J. y Alvear, C. (Editores). Actas del Simposio Los Eucaliptos en el Desarrollo Forestal de Chile. Pucón, Chile, 24 al 26 de noviembre de 1993. Santiago, Chile. Abril de 1994. Pp: 439-452.

Paton, D., 1983. Physiology of Frost Resistance in *Eucalyptus*. Colloque International Sur les *Eucalyptus* Resistants au Froid. Bordeaux, France. 26-30 septembre 1983. Pp: 107-125.

Prado, J. A.; Parra, P.; Molina, M.; Ipinza, R. y Löewe, V., 1994. Antecedentes sobre la Resistencia al Frío de Procedencias y Familias de *Eucalyptus globulus*. En: Barros, S.; Prado, J. y Alvear, C. (Editores). Actas del Simposio Los Eucaliptos en el Desarrollo Forestal de Chile. Pucón, Chile, 24 al 26 de noviembre de 1993. Santiago, Chile. Abril de 1994. Pp: 439-452.

Prado, J. A., Barros, S.; Vran, J.; Rojas, P.; Barros, D. y Aguirre, S., 1986. Especies Forestales Exóticas de Interés Económico para Chile. Instituto Forestal - Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 168 p.

Santos, R., 1997. The *Eucalyptus* of California. [http:// www.Library.csustan.edu/bsantos /section2.htm](http://www.Library.csustan.edu/bsantos/section2.htm). Consulta 01.08.2005.

Schönau, A. y Purnell, R., 1987. A different Approach to Site Evaluation and Some Preliminary Results. South African Forestry Journal 114: 19-25.

Serrano, L. y Pardo, J., 1994. Hardening and Cold Resistance in *Eucalyptus globulus*: Water Relations and Bioelectrical Tests of Frost Injury. En: Pereira, J. y Pereira, H. (Editores). *Eucalyptus* for Biomass Production. Lisboa, Portugal. Pp: 134-142.

Shelbourne, C., 2000. Some Insighton Hybrids in Forest Tree Improvement. En: Dungey, H.; Dieters, M. and Nikles, D. (editors). Proceedings of QFRI/CRC-SPF Symposium: Hybrid Breeding and Genetics of Forest Trees. Noosa, Queensland, Australia. 9-14 April, 2000. Pp: 53-62.

Strauss, S.; Brunner, A.; Busov, V.; Ma, C. and Meilan, R., 2004. Ten Lessons from 15 Years of Transgenic *Populus* Research. In: Kellison, R.; Mc. Cord, S. and Gartland, K. (editors). Forest Biotechnology in Latin America. Proceedings from the Workshop Biotecnología Forestal. Global Biotechnology Forum. Concepción, Chile. 2-5, March 2004. Pp: 97-106.

Tibbits, W.; Potts, B. y Savva, M., 1991. Inheritance of Freezing Resistance in Interespecific F1 Hybrid of *Eucalyptus*. Theor. and Appl. Gen. 83: 126-135.

Tilyard, P.; Potts, B. and Gore, P., 2000. Advanced Generation Hibridisation between *Eucalyptus nitens* and *E. globulus*. En: Dungey, H.; Dieters, M. and Nikles, D. (editors). Proceedings of QFRI/CRC-SPF Symposium: Hybrid Breeding and Genetics of Forest Trees. Noosa, Quensland, Australia. 9-14 April, 2000. Pp: 514.

Toval, G., 2004. *Eucalyptus globulus* Clonal Silviculture in Mediterranean Climate. En: *Eucalyptus* in a Changing World. International IUFRO Conference of the WP2.08.03 on Silviculture and Improvement of Eucalypts. Aveiro, Portugal. 11-15 october, 2004. CD.

Volker, P., 1995. Evaluation of *Eucalyptus nitens* x *E. globulus* for Commercial Forestry. En: Conference CRCTHF-IUFRO, Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Australia, 19-24 de febrero. Pp: 222-225.

Zuñiga, G., 2000. *Deschampsia antarctica*: La Planta que Viene del Frío. Bioplanet 1(5):30-32.



15. SELECCIÓN INTRAESPECÍFICA PARA MEJORAR LA TOLERANCIA A LA SEQUÍA DE *Eucalyptus globulus* EN EL SECANO DE LA REGIÓN DEL BIO-BIO

Patricio Rojas V.¹
María Paz Molina B.²
Roberto Ipinza C.³
Andrés Bello D.⁴

INTRODUCCIÓN

Eucalyptus globulus Labill (*Tasmanian Blue Gum*) es la principal especie del género para la producción de pulpa y papel en el mundo por las excepcionales propiedades de su fibra corta. En Chile existen actualmente 525 mil hectáreas plantadas con la especie, lo que representa casi el 22% de la superficie total de plantaciones en el país (INFOR, 2012).

Un estudio de vulnerabilidad de los bosques al cambio climático incluido en el Programa de Cambio Climático y Ecosistemas Forestales desarrollado por INFOR, estima que este fenómeno reducirá la productividad de las plantaciones de *Eucalyptus* en el mediano y largo plazo en un 1,62%, debido a la reducción de las precipitaciones y el aumento de las temperaturas extremas que se prevén (INFOR, 2011). Otros autores proyectan un aumento del potencial productivo de la especie en la Región de la Araucanía y de los Lagos, como consecuencia del mejoramiento de las temperaturas invernales y de la disminución del número y la intensidad de las heladas (FIA, 2010).

La especie se distribuye naturalmente en el sudeste de Australia y es una de las *taxa* del complejo de la especie, constituido por *Eucalyptus globulus ssp globulus*, *E. globulus ssp bicostata*, *E. globulus ssp maidenii* y *E. globulus ssp pseudoglobulus*, que se diferencian básicamente por el número y el tamaño de las yemas florales por umbela (Dutkowski y Potts, 1999). Estudios desarrollados sobre la tolerancia a la sequía de la especie muestran que existen significativas variaciones genéticas a nivel de sub razas, procedencias y familias en su distribución natural, según resultados de ensayos de progenies plantados en Australia (Dutkowski, 1995) y en España (Toro *et al.*, 1998).

Genéticamente la especie está estratificada en 13 razas y 20 subrazas, en las cuales los estudios de marcadores moleculares han demostrado que existen tres líneas genéticas comprendiendo las principales poblaciones: a) Victoria, b) King Island y el Oeste de Tasmania, y c) el Este de Tasmania y las islas Furneaux (Dutkowski *et al.*, 1997). Además existen evidencias de que el acervo genético ha sido afectado por la hibridación inter específica a través de su historia evolutiva. Actualmente existen programas de mejoramiento genético en varios países de climas templados que cuentan con varias generaciones de selección y propagación por semillas y clones, entre los que se cuentan: Argentina, Australia, Chile, China, Etiopía, Portugal, España y Uruguay.

1 Ingeniero Forestal MSc. Instituto Forestal Sede Metropolitana. parojas@infor.cl

2 Ingeniero Forestal MSc. Instituto Forestal Sede Bio Bio. mmolina@infor.cl

3 Ingeniero Forestal, Dr. Ingeniero de Montes, Instituto Forestal, Sede Los Ríos. roberto.ipinza@infor.cl

4 Técnico Forestal, Instituto Forestal. Sede Bio Bio.

Una de las innovaciones tecnológicas de la polinización controlada de *E. globulus* fue el desarrollo del sistema OSP / OSV (*one stop pollination / one single visit*), dentro del programa de mejoramiento de Forestal Monteágüila en la década de los noventa (Espejo *et al.*, 1995) y desarrollado en forma paralela en Australia (Williams *et al.*, 1999) a partir de las investigaciones de Cauvin (1988) en *E. gunnii*. El reducido costo de la polinización controlada de la especie, producto de esta innovación tecnológica, permitió producir grandes volúmenes de semillas con pedigrí genético conocido⁵ a escala operacional en los huertos semilleros (Rojas y Griffin, 1997; Rojas *et al.*, 2001).

El proyecto Generación y Producción de Plantas de *Eucalyptus globulus* Tolerantes a la Sequía, desarrollado por el Instituto Forestal (INFOR) con financiamiento de INNOVA Chile 2006 de la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), correspondió a una iniciativa de investigación conjunta con el Centro de Regional de Investigación La Platina del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), que además contó con la participación de tres viveros forestales; Agromén, ViveroSur y Proplantas, los cuales se vincularon a este proyecto en calidad de asociados, interesados en los resultados y la transferencia de los productos biotecnológicos del proyecto.

El objetivo principal del proyecto fue poner a disposición de las empresas forestales y de los agricultores de la zona del secano interior de Chile, clones élites de *Eucalyptus globulus*, mejor adaptados a la sequía y con mejores rendimientos que los actualmente disponibles y transformar algunos de estos clones mediante la incorporación de genes específicos, para que sean capaces de expresar una resistencia aún mayor al estrés hídrico.

El presente trabajo resume una de las estrategias del proyecto sobre la base de los trabajos y resultados obtenidos con la técnica de polinización controlada OSP en madres de *E. globulus* del Huerto Clonal Agromen Ltda., usando polen de árboles *plus* seleccionados por su resistencia a sequía, con el objetivo de generar semillas híbridas intraespecíficas que combinaran la superioridad genética de los árboles del huerto con la tolerancia a la sequía de los árboles selectos en zonas semiáridas.

Se efectúa la evaluación preliminar de dos ensayos de polinización abierta y uno de polinización controlada que presentan condiciones representativas del secano interior de la Región del Bio Bio. Se estiman los parámetros genéticos de tolerancia a sequía de *E. globulus*, medidos indirectamente través de la supervivencia y crecimiento de las 24 familias de polinización controlada incluyendo testigos de polinización abierta de la misma especie y otras especies con mayor tolerancia a la sequía que *E. globulus*, como *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx*. Finalmente se concluye respecto de la aplicabilidad de estrategias de mejoramiento genético para mejorar la tolerancia a la sequía de *E. globulus* en zonas de secano de la Región del Bio Bio.

OBJETIVOS

Evaluación de la supervivencia y el crecimiento juvenil de progenies de polinización abierta (PA) y controlada (PC) de *E. globulus* establecidas en el secano de la Región del Bio Bio, seleccionadas por su tolerancia a la sequía.

5 Full sib families, cruza con padre y madre con ranking genético superior

- Obtención de un *ranking* de procedencias y familias y su interacción en ensayos establecidos en secano de la Región del Bio Bio
- Estimación de parámetros fenotípicos en supervivencia y crecimiento de las familias respecto de los controles operacionales y las otras especies; *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx*
- Selección de procedencias y familias de *E. globulus* para zonas de secano

METODOLOGÍA

Selección de Árboles de *E. globulus* Tolerantes a la Sequía

Durante el desarrollo del proyecto se seleccionaron 107 árboles plus de *Eucalyptus globulus* tolerantes a la sequía en plantaciones establecidas en condiciones de secano, entre las Regiones de Copiapó y Bio Bio. Estos individuos exhibían características superiores de volumen y forma en ambientes en que las limitaciones hídricas restringen el crecimiento de la especie. La selección del material elite se inició con la selección de áreas marginales para el desarrollo de alta productividad para *Eucalyptus globulus* en referencia a la tolerancia a la sequía.

Metodológicamente se utilizó la información proveniente del Programa de Actualización de Plantaciones Forestales de INFOR, para la selección de rodales de *Eucalyptus globulus* entre las Regiones de Coquimbo y Bio Bio. La información está en formato digital y fue analizada mediante un sistema de información geográfico (SIG). Se dispuso también de información digital agroclimática, para las Regiones de O'Higgins y Maule, generada por el proyecto INFOR Sistema de Gestión Forestal para la Modernización de Pequeños Agricultores (INFOR, 1998), que posee información edáfica y climática, proveniente de diversas cartografías y escalas; citando algunas:

- Evaluación y Zonificación de los Recursos Climáticos de la IV Región de Chile (Caldentey y Pizarro, 1980), cartografía a escala 1: 500.000.
- Distritos Agroclimáticos de la Región de Coquimbo (Caldentey, 1987)
- Los grandes Grupos de Suelos en Chile (Roberts y Díaz, 1959/60)
- Mapa Geológico de Chile (Servicio Nacional de Geología y Minería, 1982) a escala 1:1.000.000.

En el SIG se seleccionaron rodales de *Eucalyptus globulus* con edades entre seis y diez años, para todas las regiones del área de estudio. En la Región de Coquimbo, dada la escasa superficie de esta especie, no se incorporó ningún otro criterio de selección en oficina. En la Región de Valparaíso, además de la edad, se seleccionó como candidatos a aquellos rodales localizados al oriente de la cordillera de la Costa.

Para el resto de las regiones, se utilizó la cobertura agroclimática para discriminar las zonas más secas dentro de cada una, principalmente los antecedentes de precipitación promedio anual y total de meses secos. Estos fueron los criterios usados para las regiones del sur que se describen en el Cuadro N° 1.

Cuadro N° 1
ANTECEDENTES CLIMÁTICOS REGIONES DE O'HIGGINS AL BIOBIO

Región	Precipitación Media Anual (mm)	Período Seco (Meses)
O'Higgins	450 – 753	Mayor o igual a 7
Maule	691 – 780	Mayor o igual a 7
Bio Bio	765 – 917	Mayor o igual a 6

Al seleccionar las plantaciones que estaban dentro de estas zonas agroclimáticas, se obtuvo los rodales de *Eucalyptus globulus* candidatos a ser visitados en terreno para su posterior validación. Con posterioridad se definió una metodología de selección de árboles en terreno que fue traspasada a técnicos y profesionales del proyecto que estarían involucrados en el proceso de selección de árboles. La selección en plantaciones se efectuó con el sistema de árboles de comparación, completando una ficha de evaluación individual para cada árbol candidato. En general, los árboles debían cumplir los requisitos que se señalan en el Cuadro N° 2.

Cuadro N° 2
CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS ÁRBOLES PLUS

Variable	Descripción
Edad	Estar presentes en rodales coetáneos de densidad uniforme
Dominancia	Ser dominantes (excepcionalmente codominantes) y no ser un árbol borde
DAP	Diámetro superior al promedio del rodal
Fuste	Recto, cilíndrico y sin crecimiento en espiral, el árbol no debe estar inclinado
Copa	De diámetro pequeño y balanceada
Ramas	Cortas, de poco diámetro y de ángulo de inserción en el fuste lo más cercano a 90°.
Estado sanitario	Buena tolerancia a enfermedades, deficiencias y plagas, principalmente libre de ataque de <i>Phoracantha semipunctata</i>

Colecta de Yemas Florales

La colecta de yemas florales se efectuó en agosto y septiembre de 2008 y su procesamiento se realizó en laboratorio el mismo mes. Se seleccionaron yemas en ántesis en un estadio inmediatamente anterior a la caída del opérculo. Se cortaron secciones de ramas con flores en la fenofase mencionada, de aproximadamente 40 cm, las que se trasladaron al laboratorio en bolsas plásticas dentro de una caja térmica. Una vez en laboratorio, se depositaron en frascos con agua, teniendo la precaución de recortar las láminas foliares y especialmente de etiquetar cada frasco con el código del clon correspondiente.



Figura N° 1
COLECTA DE YEMAS FLORALES (IZQ.) Y MATERIAL VEGETATIVO
DE ÁRBOLES PLUS (DER.)

Procesamiento del Polen en Laboratorio

Después de desprenderse el opérculo y extenderse los estambres, se cortaron los anillos estaminales con un bisturí curvo. El material obtenido se secó por 24 a 48 horas a una temperatura de 25 a 30°C, actividad que se realizó indistintamente en un horno de secado o en desecadores con sílica gel seca. Una vez seco, el polen se extrajo sacudiendo las flores o anillos estaminales sobre pedazos de papel de aluminio. También resultó útil sujetar la flor con unas pinzas y frotar los estambres con una pequeña espátula o aguja. El polen obtenido se depositó en tubos Eppendorf, identificados con el código del clon y la fecha de obtención. Estos tubos se dispusieron en un frasco de vidrio, tapado, con sílica gel y almacenados en refrigerador a 4°C

Viabilidad del Polen

Se realizó inmediatamente una prueba de germinación después de su procesamiento y antes de ser utilizado por la polinización en terreno. Para ello se utilizó un medio líquido de germinación consistente en un litro de agua destilada, donde se adicionaron 300 g de sucrosa (30%) y 150 mg de ácido bórico, posteriormente se esterilizó en autoclave por 10 minutos a 70 KPa y se almacenó congelado. Antes de su utilización se descongeló en microondas. Para analizar la viabilidad del polen se usó pequeños frascos Snap con 2 ml de la solución descongelada, a los cuales se les agregó una pequeña cantidad de polen de cada clon o *mix* considerado. Posteriormente, los frascos se etiquetaron e incubaron a 25°C por 36 horas. Una vez finalizada la incubación, se transfirió una gota de cada solución con el polen a un portaobjeto de vidrio, y fue analizado en microscopio óptico con un aumento de 100x.

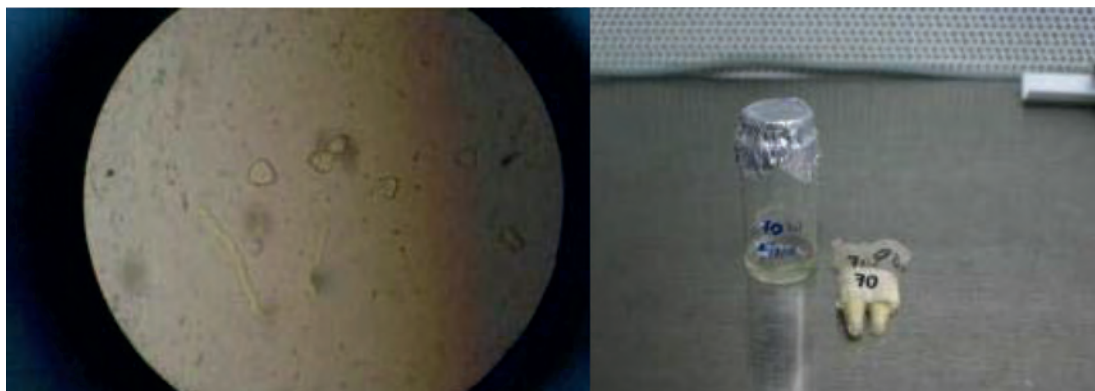


Figura N° 2
GERMINACIÓN *IN VITRO* DE TUBOS POLÍNICOS (IZQ.)
POLEN ALMACENADO PARA LOS CRUZAMIENTOS DE TERRENO (DER.)

El porcentaje de granos germinados se determinó por conteo, considerándose como germinados a aquellos granos cuyos tubos polínicos exhibían una longitud superior al diámetro del grano de polen. La viabilidad del polen *in vitro* estuvo entre 0 y 23%, con un promedio ponderado de 7,3% y una cantidad total de 7,16 g. Se considera que el polen de *Eucalyptus spp* es adecuado para efectuar cruzamientos si su viabilidad es superior al 5%. Si bien existen clones cuyo polen germinó en un valor inferior al 5%, el promedio ponderado del total colectado es superior al valor umbral, de modo que fue posible usar la mezcla total de todos los clones o alternativamente usar en forma individual solo los de mayor germinación, tal como se hizo en las actividades que aquí se describen. Se considera que para polinizar cada flor se requiere del orden de 7×10^{-4} g de polen, de modo que se cuenta con un *stock* suficiente para polinizar 10.000 flores, lo que resulta apropiado para los cruzamientos programados en dos temporadas de cruzamientos (2008 y 2009).

Generación de Híbridos Intraespecíficos

Las polinizaciones artificiales fueron efectuadas en el Huerto Semillero Clonal de Confluencia perteneciente a la empresa Agromen Ltda., localizada en las proximidades de Confluencia (Chillán, Región del Bio Bio). El huerto tiene una superficie de 1,5 hectáreas y posee en la actualidad 30 clones, plantados en bloques, con espaciamiento de 4 x 4 m. Se seleccionó clones de acuerdo a su *ranking* genético, disponibilidad y acceso a las flores con escalas de 3 m. Los cruzamientos artificiales fueron efectuados mediante la tecnología de hibridación OSP, la que se sustenta en lo siguiente: a) No es necesario esperar la maduración del estigma para la receptividad del grano de polen y asegurar el éxito de la fertilización de los óvulos y b) Todas las labores de la polinización como la emasculación, polinización y aislación se efectúan en una sola actividad del operador, reduciendo el costo de la polinización y aumentando el número de semillas por flor polinizada.



Figura N° 3
EMASCULACIÓN (IZQ.), FLOR EN ÁNTESIS (CENTRO) Y YEMA POLINIZADA OSP (DER.)

Las cápsulas fueron cosechadas con su identificación y puestas en bolsas de papel para su traslado al laboratorio. Estas fueron secadas en horno a una temperatura de 25°C y posteriormente dejadas en cápsulas Petri para su conteo. Las semillas fueron separadas manualmente de la paráfisis, donde se consideró como semillas maduras a aquellas de color más oscuro.

Viverización de las Familias de Polinización Abierta y Controlada

La producción de plantas de las familias de polinización abierta y controlada de *E. globulus* fue efectuada en el vivero Agromen. Previo al inicio de la viverización se desarrolló una jornada de capacitación conjunta entre INFOR y la empresa para estandarizar el sistema de producción, manejo de las plantas e identificación del material genético para los ensayos. Se estimó como meta la producción de 200 plantas por cada progenie, con el fin de establecer 50 plantas por ensayo más el material requerido para establecer las hileras de borde.



Figura N° 4
SIEMBRA MANUAL DE LAS FAMILIAS (IZQ.) Y VIVERIZACIÓN
EN VIVERO AGROMEN (DER.)

El material genético para los ensayos de polinización abierta consideró un total de 72 progenies, de los cuales 56 correspondieron a progenies de los árboles plus colectados en zonas de secano, 13 progenies australianas de alta productividad, con ranking genético del programa de INFOR, y 3 lotes de comparación: (a) Un lote de semilla comercial de *E. globulus* y dos especies con mayor tolerancia a la sequía como: (b) *E. camaldulensis* y (c) *E. cladocalyx* correspondiente a colecta de semillas de un ensayo de polinización abierta en Tunga Norte, Región de Coquimbo. (Figura N° 5 y Anexo N° 1). El material genético para el ensayo de polinización controlada

consideró un total de 37 lotes, de los cuales 30 correspondían a cruzamientos entre madres australianas que pertenecen a clones del Huerto Clonal Agromen, con ranking genético y polen colectado de los árboles plus en zonas de secano, en tanto 7 familias corresponden a las mismas madres australianas como controles de polinización abierta (Figura N° 5 y Anexo N° 2).

Establecimiento de los Ensayos de Progenies en el Secano Interior de la Región del Bio Bio

Los sitios fueron seleccionados en zonas representativas del secano interior de la Región del Bio Bio, donde la especie *E. globulus* presentaría restricciones de tipo hídrico para su crecimiento. Se estableció dos ensayos de polinización abierta en los predios La Posada y San Vicente y un ensayo de polinización controlada en el predio El Mirador. En el Cuadro N° 3 se presentan las características climáticas de los ensayos y su comparación con los requerimientos de *E. globulus*. La información climática de los ensayos de La Posada y San Vicente se ha relacionado con la estación meteorológica de Chillán, en tanto que la del ensayo de El Mirador se ha relacionado con la estación meteorológica de San Carlos.



Figura N° 5
LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS ENSAYOS

Cuadro N° 3
ANTECEDENTES CLIMÁTICOS DE LOS ENSAYOS

Ensayo	Progenies	Testigos	Precipitación Media Anual (mm)	Meses Secos (N°)	T° Máx. Mes más Cálido (°C)	T° Media Anual (°C)	T° Mín. Absoluta (°C)
San Vicente (Quinchamali)	61 PA	ECa y ECI	1.107	4	38	13	-8
La Posada (Portezuelo)	45 PA	ECa y ECI	1.107	4	38	13	-8
El Mirador (San Carlos)	24 PC Y 6 PA	ECa y EGI	1.346 (80% otoño- invierno)	4	34	15	
Requerimientos <i>E. globulus</i>			550-1500	0 - 7	19 - 30	9 - 8	-8

PA= polinización abierta, PC = polinización controlada. ECa= *E. camaldulensis* ECI = *E. cladocalyx* EGI = *E. globulus*

Se comparan estos registros con los requerimientos climáticos de *E. globulus* citados por Booth y Pryor (1991). Aunque las precipitaciones de los ensayos están dentro de los requerimientos de la especie, las temperaturas medias anuales y las máximas de los meses más cálidos, exceden largamente los requerimientos de la especie.

Silvicultura de Establecimiento de los Ensayos

En el Cuadro N° 4 se entrega antecedentes del establecimiento de los ensayos. Estos fueron plantados en septiembre del 2009 y septiembre del 2010, con silvicultura intensiva que incluyó la preparación de suelos con subsolador, control de maleza químico pre y post emergente, y fertilización de apoyo. Las plantas fueron producidas en bandejas (*speedling trays*) con capacidad de sustrato de 130 cm³. El espaciamiento de los ensayos El Mirador y La Posada fue de 3,0 x 2,5 metros y el de San Vicente de 3 x 3 m.

Cuadro N° 4
SILVICULTURA DE ESTABLECIMIENTO DE LOS ENSAYOS

Predio	El Mirador	La Posada	San Vicente
Región	Bio Bio	Bio Bio	Bio Bio
Provincia	Ñuble	Ñuble	Ñuble
Comuna	San Carlos	Portezuelo	Chillán
Sector	El Trapiche	La Posada	Quinchamalí
Asociado	PROPLANTAS	AGROMEN	AGROMEN
Fecha de Plantación	Sep-10	Sep-10	Sep-09
Tipo de planta	Bandeja cavidad 130 cc	Bandeja cavidad 130 cc	Bandeja cavidad 130 cc
Espaciamiento	3,0 x 2,5 m	3,0 x 2,5 m	3,0 x 3,0 m
Diseño del Ensayo	36 progenies (4 plantas/6 réplicas)	50 progenies (4 plantas/6 réplicas)	63 progenies (4 plantas/6 réplicas)
Preparación del Suelo	Subsolado c/camellón	Casilla 30 x 30 x 30 cm	Subsolado c/camellón
Superficie del Ensayo	0,65 ha	0,9 ha	1,36 ha
Silvicultura pre-plantación	CMQ	Roce y fajas con buldozer CMQ	Roce CMQ
Silvicultura post-plantación	Fertilización y CMQ	Fertilización	Fertilización
Hileras de borde	Plantación comercial	1 hilera de <i>E. camaldulensis</i> y plantación comercial	Plantación comercial

CMQ: Control Químico de Malezas.



Figura N° 6

ENSAYO SAN VICENTE A LOS 20 MESES DE EDAD (IZQ.), ENSAYO LA POSADA A LOS 8 MESES DE EDAD (CENTRO) Y ENSAYO EL MIRADOR A LOS 8 MESES DE EDAD (DER.)

RESULTADOS

Para efecto del análisis estadístico, las progenies fueron agrupadas en aquella de *alta productividad*, que corresponden a selecciones de *E. globulus* en ensayos de progenies de larga data de INFOR y clonados en huertos semilleros para la producción de semillas mejoradas genéticamente; y *selecciones de secano* que corresponde a la descendencia de las selecciones de los árboles de secano (Anexo N° 1). Dentro de esos grupos se segregaron por zonas climáticas y finalmente por procedencias (Anexo N° 3)

Dadas las edades de evaluación, se realizó un análisis estadístico preliminar a través del software INFOSTAT para detectar diferencias significativas entre grupos de progenies, zonas climáticas y procedencias a partir de las variables de crecimiento como diámetro y altura. Como una forma de hacer comparables los resultados se estimó el incremento anual medio de la altura.

Cuadro N° 5
EDAD DE MEDICIÓN Y VARIABLES DE LOS ENSAYOS

Ensayo	Tipo Ensayo	Edad 1ª Medición (meses)	Variables Evaluadas	Edad 2ª Medición (meses)	Variables Evaluadas
San Vicente	PA	19	Altura (cm) DAC (mm)	30	Altura (cm) DAP (mm) IMA (cm)
La Posada	PA	7	Altura (cm) DAC (mm)	18	Altura (cm) DAC (mm) IMA (cm)
El Mirador	PC	7	Altura (cm) DAC (mm)	20	Altura (cm) DAC (mm) IMA (cm)

PA = Polinización Abierta.

PC = Polinización Controlada.

DAC = Diámetro a la altura del cuello. Se utilizó esta variable cuando no todos los árboles alcanzaban la altura a la que se mide el DAP (1,3 m)

DAP = Diámetro a la altura del pecho (1,3 m)

IMA = Incremento Anual Medio Altura.

En relación a que se evidenciaban diferencias significativas se realizó una evaluación genética, utilizando el sistema ASREML, de modo de determinar los valores de mejoramiento a nivel de árbol y progenie o familia. Una vez obtenidos los valores individuales se procedió

nuevamente a utilizar el sistema INFOSTAT para determinar las diferencias significativas entre las distintas progenies.

Adicionalmente, se realizó la comparación de medias a través del Test de Tuckey para determinar diferencias significativas entre grupos, zonas climáticas y procedencias.

Ensayos de Progenies de Polinización Abierta

La silvicultura intensiva de establecimiento explica una alta supervivencia, del 92%, para ambos ensayos (Cuadro N° 6).

La mayor supervivencia del ensayo San Vicente a los 30 meses de edad se presenta en el testigo *E. camaldulensis*. En cambio la mayor supervivencia para el ensayo La Posada, evaluado a los 18 meses, corresponde a las progenies de secano. La menor supervivencia del ensayo San Vicente corresponde al testigo *E. cladocalyx* y en el ensayo La Posada a *E. camaldulensis*.

Aparentemente las menores temperaturas invernales y la mayor presencia de heladas en el ensayo San Vicente afectaron a *E. cladocalyx*, especie muy tolerante a la sequía, pero no a las heladas. Las progenies de selecciones de secano presentan una mayor supervivencia que las selecciones de productividad, pero con valores muy cercanos.

Cuadro N° 6
SUPERVIVENCIA DE PROGENIES POR ENSAYO

Grupo	Supervivencia Ensayo Segunda Medición			
	Media San Vicente	Rango	Media La Posada	Rango
	(%)			
Alta Productividad	92,4	87,5 - 100	91,3	75,0 - 100
Secano	92,5	79,2 - 100	92,3	75,0 - 100
<i>E. camaldulensis</i>	100,0	100	87,5	87,5
<i>E. cladocalyx</i>	75,0	75	91,7	91,7
Promedio del Ensayo	92,3		92,0	

Ensayo de Progenies San Vicente

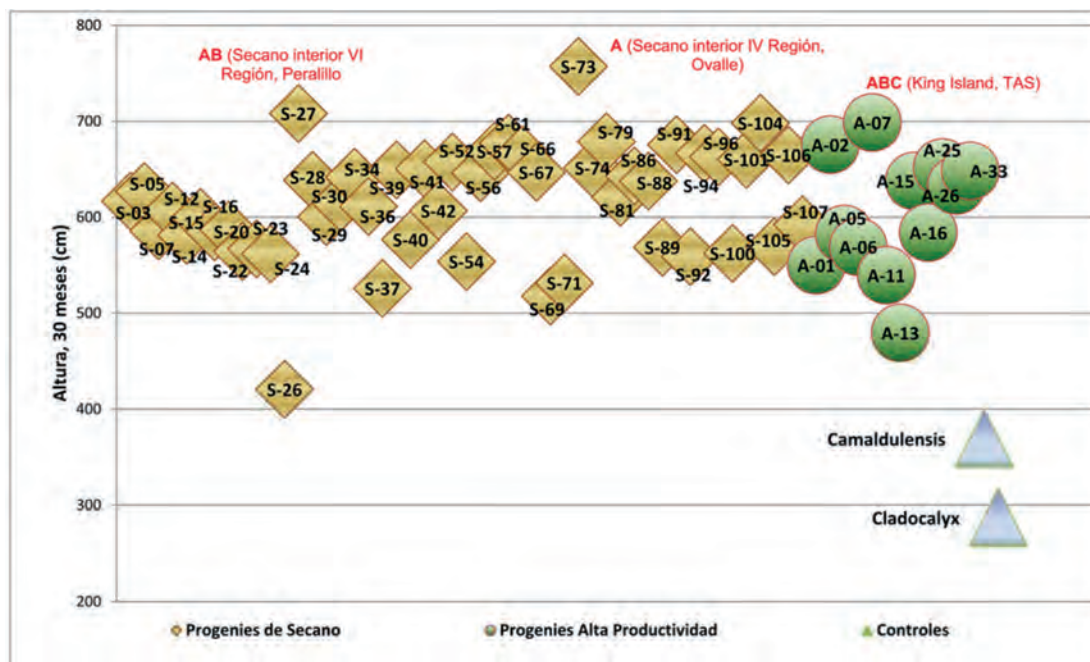
En los Cuadros N° 6, 7 y 9 se presentan las diferencias significativas entre grupos, zonas climáticas y origen geográfico de las progenies ensayadas. El detalle de esta clasificación se encuentra en el Anexo N° 3.

A nivel de grupos de progenies no se detectaron diferencias significativas en crecimiento a diferentes edades (Cuadro N° 7), sin embargo las selecciones de secano fueron siempre superiores en crecimiento a las selecciones en productividad y los controles tolerantes a la sequía (Figura N° 9). Se ignora si estas diferencias de crecimiento se estabilizarán o aumentarán con la edad en esta condición de secano, solo nuevas mediciones a edades más avanzadas responderán a esta interrogante.

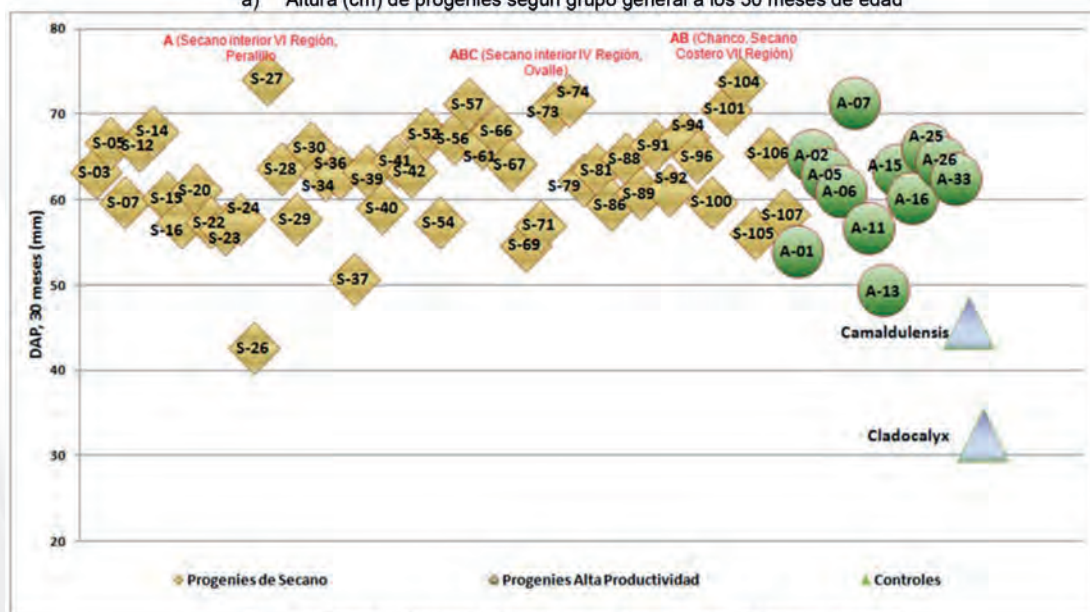
Cuadro N° 7
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE GRUPOS DE PROGENIES
ENSAYO SAN VICENTE

Grupo	30 meses											
	IMA Altura (cm)				Altura (cm)				DAP (mm)			
Secano	292,0	A			615,5	A			62,8	A		
Alta Productividad	290,8	A			604,1	A			61,4	A		
<i>E. camaldulensis</i>	132,7			C	369,0		B		45,5		B	
<i>E. cladocalyx</i>	157,4		B		287,4			C	32,3			C





a) Altura (cm) de progenies según grupo general a los 30 meses de edad



b) DAP (mm) de progenies según grupo general a los 30 meses de edad

Figura N° 9
VARIABLES DE ALTURA (a) Y DAP (b) DE PROGENIES SEGÚN GRUPO
A LOS 30 MESES DE EDAD ENSAYO SAN VICENTE

A la edad de 30 meses para Altura y DAP, *E. camaldulensis* es superior a *E. cladocalyx* en forma significativa, pero *E. cladocalyx* tiene un IMA en Altura mayor y con diferencias significativas a *E. camaldulensis*.

Se destaca con un mayor crecimiento y con diferencias significativas la progenie S-73 (Ovalle, Región de Coquimbo) con 757,1 cm de altura y la progenie S-27 (Peralillo, Región de O'Higgins) para DAP con 74,1 mm con 30 meses de edad, ambas pertenecientes a las selecciones de secano.

Cuadro N° 8
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE ZONAS CLIMÁTICAS ENSAYO SAN VICENTE

Zona Climática / Región	30 meses														
	Altura (cm)					DAP (mm)					IMA Altura (cm)				
SC Coquimbo	610,2		B	C	D		63,3		B	C	D		290,4		B
SI Coquimbo	467,3					E	48,2					F	232,6		D
SC Valparaíso	664,3	A					66,2	A	B				322,6	A	
SI Valparaíso	623,0	A	B	C			64,0	A	B	C			294,3		B
SC O'Higgins	591,9			C	D		61,7			C	D		282,4		B
SI O'Higgins	482,2					E	52,8					E	209,9		E
SC Maule	652,8	A	B				68,0	A					309,6	A	B
SI Maule	626,7	A	B	C			63,4		B	C	D		282,5		B
SC Bio Bio	562,3				D		59,8				D		258,3		C
Tasmania, AUS	598,5			C	D		61,7			C	D		289,0		B
Victoria, AUS	615,4	A	B	C			61,9			C	D		294,4		B

SC: Secano Costero. SI: Secano Interior. AUS: Australia

De acuerdo a los resultados que se presentan en el Cuadro N° 8, las familias procedentes de las zonas climáticas relacionadas con el Secano Interior de las Regiones de Coquimbo y O'Higgins presentan el menor crecimiento para todas las variables evaluadas. Por otra parte, las familias provenientes del Secano Costero de las Regiones de Valparaíso y Maule muestran el mejor desempeño en el ensayo para las tres variables de crecimiento evaluadas; DAP, Altura e IMA Altura. En segundo lugar se destacan las familias provenientes de la zona climática del Secano Interior de la Región de Valparaíso, las cuales solo tienen diferencias significativas de menor crecimiento en la variable IMA Altura. El desempeño de aquellas de la zona climática correspondiente al Secano Interior de la Región del Maule muestra resultados de crecimiento muy similares a la de Victoria de Australia. En estas últimas ambas presentan diferencias significativas superiores solo para la variable Altura.

De acuerdo al origen geográfico de las familias (Cuadro N° 9) no hubo diferencias significativas en IMA en Altura entre las procedencias de King Island, Tasmania, Australia; Zapallar, Valparaíso; Cauquenes, Maule; South West Apollo Bay, Victoria, Australia; y Ovalle, Coquimbo, pero si entre estas y el resto de los orígenes geográficos de las selecciones. Los IMA en altura fueron superiores a los 3 m a los 30 meses de edad.

En relación al crecimiento en Altura, DAP e IMA en Altura, las familias de Tunga Norte, Coquimbo, representada por *E. cladocalyx*; Lolol, O'Higgins, representada por *E. camaldulensis*; y Badgers Ck Quarry de Tasmania en Australia, representada por *E. globulus*, presentaron el desempeño más bajo.

Para el crecimiento en DAP destacan con mayores valores para la variable, las familias procedentes de King Island, Tasmania Australia, Cauquenes, Maule; y Zapallar, Valparaíso.

En el caso de la Altura e IMA en Altura, para el mayor valor, se estrechan las diferencias significativas entre las distintas procedencias u orígenes geográficos.

Cuadro N° 9
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE ORIGEN GEOGRÁFICO DE LAS
FAMILIAS EN ENSAYO SAN VICENTE

Origen Geográfico / Región	30 meses																	
	Altura (cm)						DAP (mm)						IMA Altura (cm)					
La Serena, Coquimbo	610,2		B	C	D		63,3			C	D		290,4	A	B	C		
Ovalle, Coquimbo	647,1	A	B	C			64,1			C	D		307,8	A				
Tunga Norte, Coquimbo	287,4					G	32,3					F	157,4				D	
Zapallar, Valparaíso	664,7	A	B				66,2	A	B	C			322,6	A				
Casablanca, Valparaíso	623,0	A	B	C	D		64,0			C	D		294,3	A	B			
La Estrella, O'Higgins	591,9		B	C	D		61,7			C	D		282,4	A	B	C		
Peralillo, O'Higgins	595,4		B	C	D		60,1			C	D		287,1	A	B	C		
Lolol, O'Higgins	369,0					F	45,5					E	132,7				D	
San Javier, Maule	626,7	A	B	C	D		63,4			C	D		282,5	A	B	C		
Chanco, Maule	637,0	A	B	C	D		64,8		B	C			298,3	A	B			
Cauquenes, Maule	668,7	A	B				71,2	A	B				320,9	A				
Ninhue, Bio Bio	562,3				D		59,8			C	D		258,3		B	C		
SW Apollo Bay, Vic, AUS	644,7	A	B	C			64,7		B	C			316,5	A				
W Kennett River, Vic AUS	622,3	A	B	C	D		63,1			C	D		281,2	A	B	C		
Jeeralang North, Vic AUS	579,2			C	D		57,8				D		285,6	A	B	C		
King Island, Tas, AUS	698,6	A					71,3	A					323,3	A				
Moogara, Tas, AUS	633,0	A	B	C	D		64,3			C			300,8	A	B			
Central Flinders Island, Tas, AUS	583,1			C	D		61,6			C	D		281,9	A	B	C		
Badgers Ck Quarry, Tas, AUS	479,3					E	49,4					E	249,9			C		

- Ensayo de Progenies La Posada

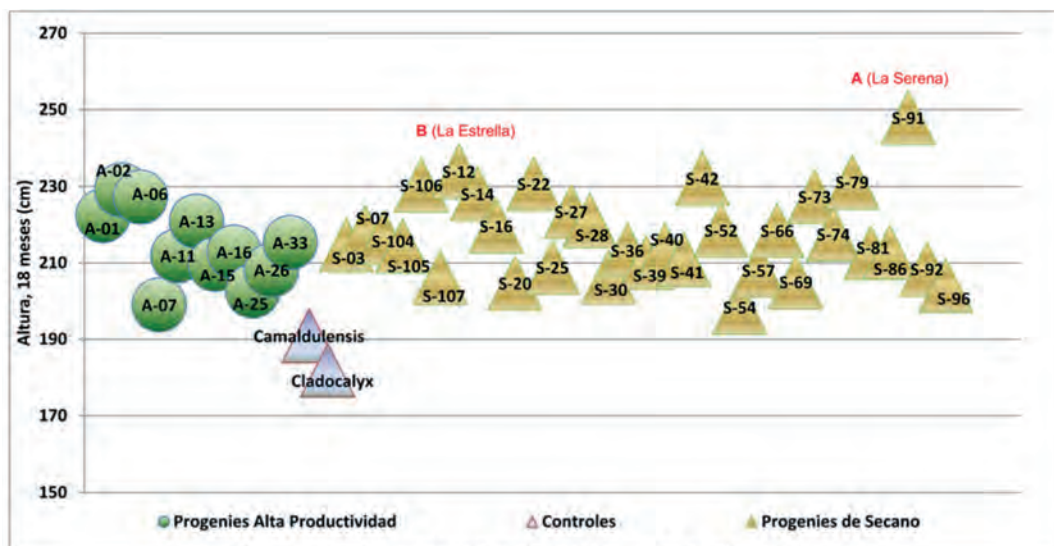
En los Cuadros N° 10, 11 y 12 se presentan las diferencias significativas entre grupos, zonas climáticas y orígenes geográficos de las progenies ensayadas.

Se puede visualizar en el Cuadro N° 10 que no existen diferencias significativas en altura, DAC e IMA en Altura a la edad de 18 meses entre las selecciones de secano de *E. globulus* y el control *E. camaldulensis*, pero si respecto de las selecciones de *E. globulus* de alta productividad y *E. cladocalyx* (Figura N° 10). Este último es el que presenta el menor desempeño para todas las variables evaluadas.

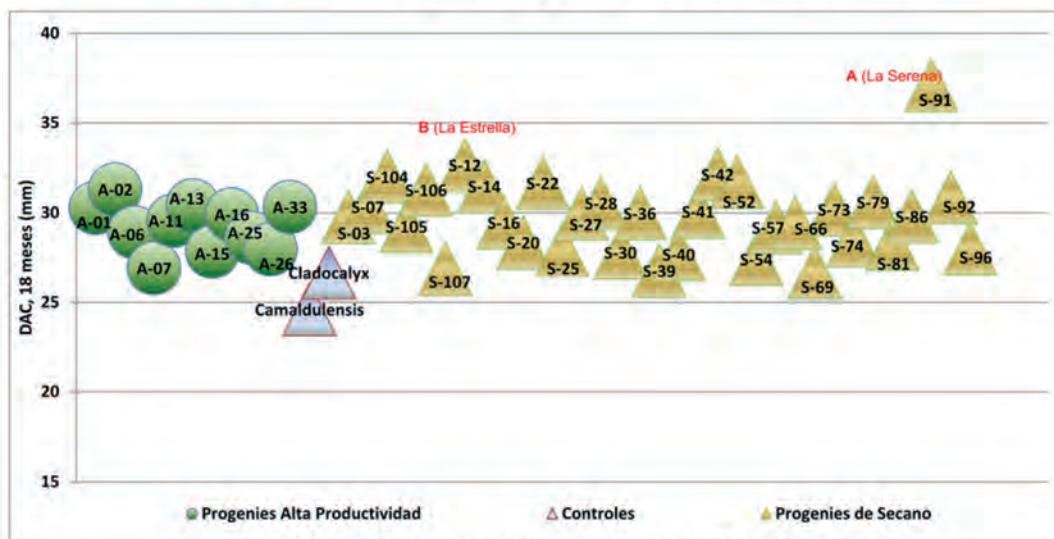
Cuadro N° 10
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE GRUPOS DE PROGENIES
ENSAYO LA POSADA

GRUPO	18 meses											
	Altura (cm)				DAC (mm)				IMA Altura (cm)			
Secano	214,5	A			29,3	A			122,5	A		
Alta Productividad	190,9		B		26,7		B		100,3		B	
<i>E. camaldulensis</i>	217,2	A			29,8	A			122,9	A		
<i>E. cladocalyx</i>	181,9			C	24,6			C	91,1			C





a) Altura (cm) de progenies según grupo general a los 18 meses de edad



b) DAP (mm) de progenies según grupo general a los 18 meses de edad

Figura N° 10
VARIABLES DE ALTURA (a) Y DAP (b) DE PROGENIES SEGÚN GRUPO A LOS 18 MESES
DE EDAD ENSAYO LA POSADA

Al analizar las diferencias significativas entre zonas climáticas de las progenies (Cuadro N° 11) a los 18 meses de edad, las progenies provenientes del Secano Costero de la Región de Coquimbo presentan el mayor desempeño para las variables Altura y DAC, diferenciándose significativamente con todas las restantes zonas climáticas. En el caso de la variable IMA Altura esta zona climática comparte los mejores resultados con las zonas climáticas Secano Costero de la Región de O'Higgins, el Secano Interior de la Región de Coquimbo y la zona de Victoria en Australia. El menor desempeño para todas las variables evaluadas lo presenta la zona climática Secano Costero de la Región de Valparaíso, seguida por la de Tasmania, Australia.

Cuadro N° 11
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE PROGENIES DE DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS
ENSAYO LA POSADA

Zona Climática / Región	18 meses																	
	Altura (cm)						DAC (mm)						IMA Altura (cm)					
SC Coquimbo	228,1	A					34,0	A					125,8	A				
SC Valparaíso	204,0					F	28,0					G	116,7					F
SC O'Higgins	221,4		B				30,5		B				124,9	A	B			
SC Maule	215,1			C	D		29,7			C	D		121,3			C	D	E
SI Coquimbo	213,9			C	D	E	29,0				D	E	123,0	A	B	C	D	
SI Valparaíso	215,0			C	D		30,3		B	C			122,8		B	C	D	E
SI O'Higgins	210,9				D	E	28,2					F	G	116,1				F
SI Maule	211,7				D	E	28,1					F	G	120,1				E
Tasmania AUS	210,2					E	28,8				E	F	120,4				D	E
Victoria AUS	216,9			C			29,5				D	E	123,7	A	B	C		

SC: Secano Costero. SI: Secano Interior. AUS: Australia

Cuadro N° 12
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE PROCEDENCIAS U ORIGEN GEOGRÁFICO
ENSAYO LA POSADA

Origen Geográfico / Región	18 meses																			
	Altura (cm)						DAC (mm)						IMA Altura (cm)							
APS, Lolol, O'Higgins	190,9					I	24,6					I	91,1					J		
APS, Tunga Norte, Coquimbo	181,9					J	26,7					H	100,3					I		
Badgers Ck Quarry, Tas, AUS	220,9		B				30,4	B	C				122,9		C	D	E			
Casablanca, Valparaíso	215,0		B	C	D	E	30,3	B	C				122,8		C	D	E			
Cauquenes, Maule	208,1				E	F	G	29,2		C	D	E	F	118,7			E	F	G	
Central Flinders Island, Tas, AUS	212,9			D	E	F		29,9	B	C	D			126,7	B	C				
Chanco, Maule	216,9		B	C	D			29,9	B	C	D			121,9			D	E	F	
Jeeralang North, Vic, AUS	216,5		B	C	D			30,1	B	C				122,2		C	D	E		
King Island, Tas, AUS	199,0					H	26,9					G	H	110,3					H	
La Estrella, O'Higgins	221,4	A	B				30,5	B						124,9	B	C	D			
La Serena, Coquimbo	228,1	A					34,0	A						125,8	B	C	D			
Moogara, Tas, AUS	208,2				E	F	G	28,0				F	G	121,8			D	E	F	
Ovalle, Coquimbo	220,3		B	C			29,5	B	C	D	E			127,6	A	B				
Peralillo, O'Higgins	213,8			C	D	E		28,7			D	E	F	119,7				E	F	G
San Javier, Maule	211,7				D	E	F	28,1				F	G	120,1				E	F	G
SW Apollo Bay, Vic, AUS	206,1					F	G	28,2				E	F	117,5				F	G	
W Kennett River, Vic, AUS	228,2	A					30,1	B	C					132,0	A					
Zapallar, Valparaíso	204,0					G	H	28,0				F	G	116,7					G	

APS = Área Productora Semillas Vic = Victoria Tas = Tasmania AUS = Australia

De acuerdo al origen geográfico de las familias no hubo diferencias significativas para el mayor IMA en altura entre las procedencias Ovalle, Coquimbo, y W Kennett River de Victoria, Australia. Sin embargo, con el resto de los orígenes geográficos de las selecciones, si existen. El menor crecimiento para esta variable lo tienen los orígenes geográficos que representan a las familias de *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx*, Lolol, O'Higgins, y Tunga Norte, Coquimbo, respectivamente.

En el caso de las variables Altura y DAC destaca el origen geográfico de las progenies provenientes de La Serena, Coquimbo. Incluso para la variable DAC esta procedencia posee los mayores valores para la variable y se diferencia significativamente de los orígenes restantes. En el caso específico de la Altura, la procedencia mencionada comparte el mayor promedio, sin diferenciarse significativamente, con las procedencias u orígenes geográficos de La Estrella, (O'Higgins) y W Kennet River de Victoria Australia.

Ensayo de Progenie de Polinización Controlada El Mirador

Las progenies de polinización controlada fueron generadas a partir de la cruce de 10 madres y 9 padres, según se indica en el Cuadro N° 13.

Cuadro N° 13
MATRIZ DE CRUZAMIENTOS
ENSAYO EL MIRADOR

Madres (Alta Productividad)	Padres (Progenies de Secano)							
	S-22	S-70	S-72	S-80	S-83	S-86	S-89	MIX-2
A-05	PC-01	PC-02	PC-03	PC-04	PC-05	PC-06	PC-07	
A-07		PC-09		PC-10				
A-15		PC-11						PC-15
A-26		PC-16		PC-17	PC-18			PC-19
A-32	PC-20	PC-21		PC-22	PC-23	PC-24	PC-25	PC-26
A-40			PC-28		PC-29			

Las progenies de polinización controlada fueron confrontadas en un ensayo de progenies con progenies de polinización abierta (Progenies de Alta Productividad), un testigo operacional de *E. globulus* y con *E. camaldulensis*.

Luego del establecimiento del ensayo de progenies, la evolución de la supervivencia a los 7 y 20 meses posteriores a la plantación es la que se puede apreciar en el Cuadro N° 14.

Cuadro N° 14
SUPERVIVENCIA ENTRE GRUPOS DE PROGENIES
ENSAYO EL MIRADOR

Grupos	7 meses	20 meses
	Media	Media
	(%)	
<i>E. camaldulensis</i>	83,3	66,7
<i>E. globulus</i>	83,3	45,8
Polinización Abierta	78,0	69,0
Polinización Controlada	79,6	64,7
Media	77,3	63,3

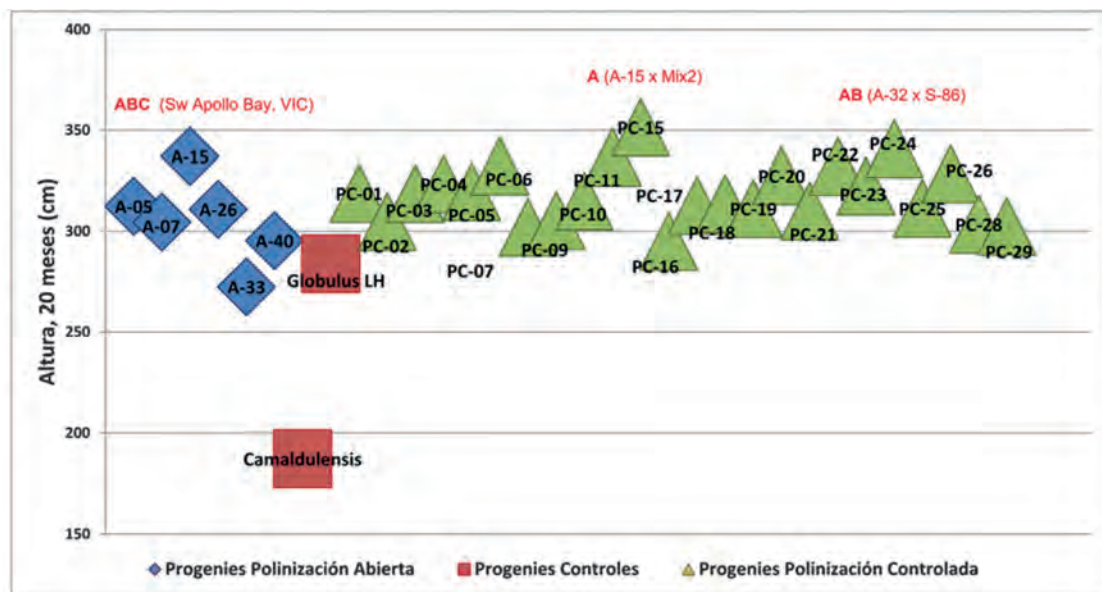
Se aprecia una alta variabilidad en la supervivencia de las progenies generadas por polinización controlada. Para las restantes progenies evaluadas las tasas de supervivencia son relativamente bajas, sobre todo para *E. globulus* comercial, semilla preferentemente utilizada por viveristas para producir plantas para zonas sin restricciones hídricas para la especie.

Cuadro N° 15
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DE CRECIMIENTO ENTRE GRUPOS DE PROGENIES
ENSAYO EL MIRADOR

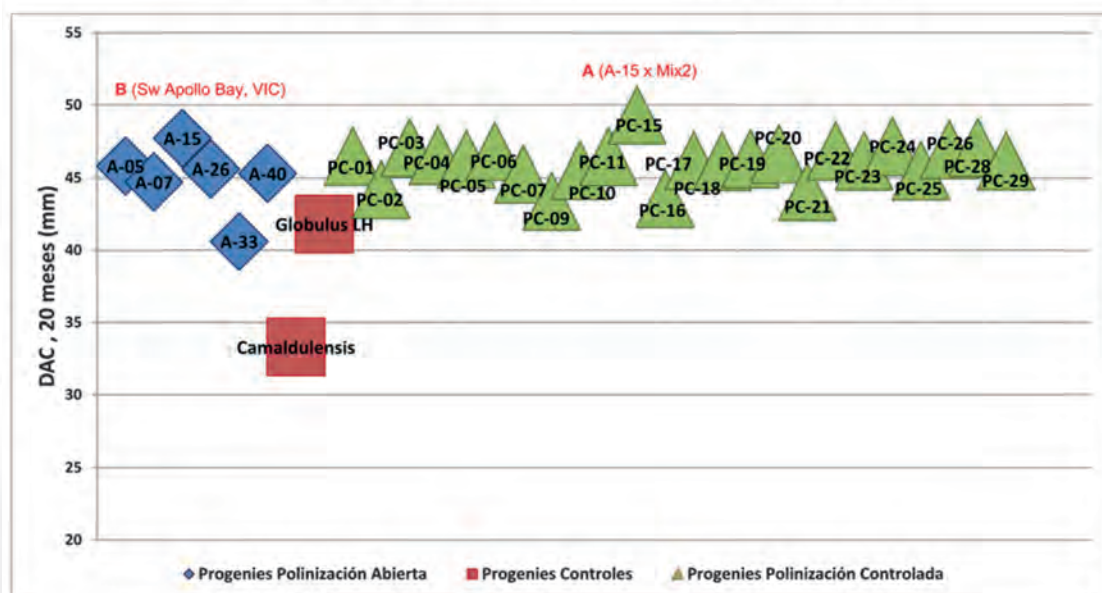
Grupo	20 meses											
	Altura (cm)				DAC (mm)				IMA Altura (cm)			
<i>E. camaldulensis</i>	187,3			D	33,3			D	68,6			C
<i>E. globulus</i> , Los Hermanos*	283,8		C		41,8		C		168,5		B	
Progenies de Polinización Controlada	319,4	A			46,0	A			176,5	A		
Progenies de Polinización Abierta	300,4		B		44,3		B		165,2		B	

*Corresponde a selecciones en el ensayo de progenies Los Hermanos

Analizando Altura, el DAC e IMA de la Altura en el Cuadro N° 15, se concluye que las progenies de polinización controlada son significativamente diferentes y superiores en todas las variables evaluadas a las progenies de polinización abierta incluyendo al control de *E. globulus* comercial (Los Hermanos) y *E. camaldulensis* (Figura N° 11).



a) Altura (cm) de progenies según grupo general a los 20 meses de edad



b) DAP (mm) de progenies según grupo general a los 20 meses de edad

Figura N° 11
VARIABLES DE ALTURA (a) Y DAP (b) DE PROGENIES SEGÚN GRUPO
A LOS 20 MESES DE EDAD

Análisis según Madre

La madre A-15 (South West, Apollo Bay de Victoria, Australia) es significativamente superior para todas las variables evaluadas a los 20 meses respecto de las otras madres donde se efectuaron las polinizaciones (Cuadro N° 16).

La madre de menor rendimiento es la madre A-33 y que corresponde a un Clon de Alta Productividad de *E. globulus* presente en el Huerto Clonal INFOR-Agromen y que ocupa el primer lugar en el ranking genético.

Cuadro N° 16
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DE CRECIMIENTO ENTRE
MADRES ENSAYO EL MIRADOR

Madre	20 meses																	
	Altura (cm)								DAC (mm)								IMA Altura (cm)	
A-05	316,8			C					45,9		B	C					175,5	B
A-07	308,2			D					44,5				D				176,9	B
A-15	342,0	A							47,5	A							191,4	A
A-26	308,7			D					45,6			C					168,5	C
A-32	324,5	B							46,0	B	C						175,9	B
A-33	271,0						G		40,4					F			140,9	D
A-40	300,4				E				46,2	B							171,9	B C
APS LH	283,8					F			41,8				E				168,5	C
<i>E. camaldulensis</i>	187,3						H		33,3					G			68,6	E

Cuadro N° 17
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE ZONAS CLIMÁTICAS
DE LAS MADRES ENSAYO EL MIRADOR

Zona Climática Madre	20 meses											
	Altura (cm)				DAC (mm)				IMA Altura (cm)			
Costa, Bio Bio	283,8			C	41,8			C	168,5	A		
Secano Interior, O'Higgins	187,3			D	33,3			D	68,6			B
Tasmania AUS	315,8	A			45,5	A			172,7	A		
Victoria AUS	304,6		B		44,4		B		167,5	A		

Al considerar las zonas climáticas de la madre (Cuadro N° 16), aquellas de origen Tasmania, Australia tienen diferencias significativas absolutas para las variables DAC y Altura. En cambio para la variable IMA no habría diferencias para el mayor crecimiento en aquellas madres provenientes de Australia (Tasmania y Victoria) ni de la Costa de la Región del Bio Bio.

El menor crecimiento para todas las variables lo presenta *E. camaldulensis* señalado como Secano Interior de la Región de O'Higgins. El detalle de las zonas climáticas y procedencias (origen geográfico) se encuentra en el Anexo N° 4.

Respecto de las mejores procedencias de las madres, no hubo diferencias significativas para la variable Altura entre las procedencias australianas SW Apollo Bay, Victoria, y SW of Cape Barren Island, Tasmania, que fueron superiores al resto de las procedencias (Cuadro N° 18).

En cambio para la variable DAC la procedencia de Victoria antes señalada es superior a las procedencias restantes. En relación a IMA de la Altura las procedencias australianas antes mencionadas, además de King Island de Tasmania, son superiores a todas las evaluadas.

El menor crecimiento lo presenta la procedencia Jeeralang North, de Victoria, Australia para *E. globulus* y Lolol, O'Higgins para *E. camaldulensis*.

Cuadro N° 18
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE PROCEDENCIAS
DE LAS MADRES ENSAYO EL MIRADOR

Procedencia Madre	20 meses																	
	Altura (cm)						DAC (mm)						IMA Altura (cm)					
Antihuala, Bio Bio	283,8					E						E						
Central Flinders Island, Tas, AUS	314,9		B	C						B	C						B	C
Jeeralang North, Vic, AUS	273,4					F						F						E
King Island, Tas, AUS	308,2			C	D							D				A	B	
Lolol, O'Higgins	187,3						G						G					F
Moogara, Tas, AUS	308,2			C	D						C						C	D
SW Apollo Bay, Vic, AUS	320,2	A	B							A						A		
SW of Cape Barren Island, TAS	324,4	A								B						A	B	C

- **Análisis según Padre**

Como se aprecia en el Cuadro N° 19, los padres S-86 Ovalle, Coquimbo, y MIX2 (mezcla de polen de distintos árboles de secano) presentan mejores resultados y con diferencias significativas con los padres restantes para las variables DAC y Altura, a excepción del padre S-72, también proveniente de la zona de Ovalle, que no se diferencia significativamente de los anteriores para la variable DAC. Para el caso de IMA Altura, el mayor valor para la variable y con diferencias significativas lo presentan los padres de secano S-86 y S-80, ambos de origen Ovalle, Coquimbo.

El menor valor para todas las variables lo presenta *E. camaldulensis*. Al considerar los padres *E. globulus*, el menor desempeño lo presentan PA LH (semilla comercial de *E. globulus*) para las variables Altura y DAC, y S-89 (La Serena, Coquimbo) para IMA Altura. Tomando en cuenta solo los padres de secano, los menores desempeños para Altura y DAC están en S-70 (San Javier, Maule) y S-89 (La Serena, Coquimbo).

En el Cuadro N° 20 se aprecia que no existen diferencias significativas entre los padres del Secano Costero de la Región de O'Higgins y los del Secano Interior de la Región de Coquimbo.

El menor desempeño para todas las variables, de acuerdo a la zona climática, lo presentan los padres provenientes del Secano Interior de la Región de O'Higgins.

En el Cuadro N° 21 se aprecia que no existen diferencias significativas entre los padres de origen geográfico La Estrella, O'Higgins, y la procedencia Ovalle, Coquimbo.

El menor desempeño lo presenta el origen Lolol, O'Higgins, que representa a *E. camaldulensis*.

De acuerdo al origen, los padres *E. globulus* de la Región del Bio Bio presentan bajos desempeños para las variables de crecimiento DAC y Altura.

Cuadro N° 19
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DE CRECIMIENTO
ENTRE PADRES ENSAYO EL MIRADOR

Padre	20 meses																							
	Altura (cm)												DAC (mm)						IMA Altura (cm)					
<i>E. camaldulensis</i>	187,3										I	33,3						H	68,62					F
<i>E. globulus</i> LH	313,1				D	E	F					44,1					F		168,60				D	
MIX2	329,7	A	B									47,4	A						179,19		B			
PA LH	283,8									H		41,8					G		168,46				D	
PA-HC	305,6					F	G					45,0				D	E		169,69			C	D	
S-22	323,2		B	C								46,6		B	C				179,11		B			
S-70	310,6					E	F	G				44,4					F		168,19				D	
S-72	311,4					E	F					47,1	A	B					180,75		B			
S-80	321,2		B	C	D							46,3			C				183,75	A	B			
S-83	314,7			C	D	E						46,2			C				176,67		B	C		
S-86	336,6	A										47,0	A	B					189,12	A				
S-89	306,6					E	F	G				45,4				D			156,21					E

Cuadro N° 20
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE ZONAS CLIMÁTICAS DE LOS PADRES
ENSAYO EL MIRADOR

Zona Climática del Padre		20 meses																
		Altura (cm)					DAC (mm)					IMA Altura (cm)						
Costa, Bio Bio		306,0			C	D		43,6				D		167,9		B		
SC	Coquimbo	306,7			C	D		45,4		B				156,2			C	
SC	O´Higgins	323,2	A					46,6	A					179,1	A			
SI	Coquimbo	318,2	A	B				46,3	A					181,6	A			
SI	O´Higgins	187,3					E	33,3					E	68,6				D
SI	Maule	312,9		B	C			44,5			C			169,5		B		
SI	Bio Bio	308,6			C	D		45,2		B				169,5		B		

SC: Secano Costero. SI: Secano Interior. AUS: Australia

Cuadro N° 21
DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS ENTRE PROCEDENCIAS
DE LOS PADRES ENSAYO EL MIRADOR

Origen Geográfico Padre	20 meses															
	Altura (cm)						DAC (mm)						IMA Altura (cm)			
Antihuala, Bio Bio.	306,0			C	D		43,6				D		167,9		B	
Confluencia, Bio Bio	308,6			C	D		45,6		B				169,5		B	
La Estrella, O'Higgins	323,2	A					46,6	A					179,1	A		
La Serena, Coquimbo	306,7			C	D		45,4		B				156,2			C
Lolol, O'Higgins	187,3					E	33,3					E	68,6			D
Ovalle, Coquimbo	318,2	A	B				46,3	A					181,6	A		
San Javier, Maule	312,9		B	C			44,5			C			169,5		B	

DISCUSIÓN

De acuerdo con Potts y Dutkowski (2012) existen diferencias significativas en daño por sequía en subrazas de *E. globulus*, resultando evidentes las variaciones en escala amplia, regionales o clines. Se observó menor daño de sequía en aquellas subrazas originarias de áreas con estacionalidad marcada en las temperaturas, pero también menor radiación y estacionalidad en las precipitaciones, menor precipitación en invierno, mayor radiación y mayores temperaturas del mes cálido. Potts y Dutkowski (2012) concluyen que las procedencias de *E. globulus* más susceptibles a la sequía corresponden a las de King Island y la costa oeste de Tasmania, en tanto las más tolerantes corresponden a Strzelecki Ranges (Jeeralang)⁶ y norte de Tasmania. A la mayor tolerancia a la sequía se asocia resistencia al cerambicido taladrador *Phoracantha semipunctata*.

La silvicultura intensiva de establecimiento explica el 92% de supervivencia de ambos ensayos de polinización abierta. La supervivencia del ensayo de polinización controlada presenta menor supervivencia, con un 63% a los 20 meses de edad, tal vez por las condiciones de mayor aridez del lugar de ensayo. Adicionalmente, el material genético de *E. globulus* de polinización abierta y el de Alta Productividad corresponde a material utilizado en zonas donde se manifiestan restricciones hídricas para la especie. En general este material genético correspondió a las madres en las cruas y en general en ese rol no tuvieron buenos resultados a excepción de la madre A-15, que corresponde a un clon de una progenie introducida desde South West Apollo Bay de Victoria, Australia que se encuentra en el Huerto Clonal de INFOR-Agromen.

En el ensayo de progenies de San Vicente no se detectaron diferencias significativas a nivel de grupos en crecimiento a diferentes edades, sin embargo las selecciones de secano fueron superiores a las selecciones en productividad y los controles tolerantes a la sequía. Se ignora si estas diferencias de crecimiento se estabilizaran o aumentarán con la edad en esta condición de secano, aspecto que se analizará con nuevas mediciones a mayor edad.

⁶ Hibridación intraespecífica de *E. globulus ssp globulus* con *E. globulus ssp bicostata*

A la edad de 30 meses, para Altura y DAP, *E. camaldulensis* es superior a *E. cladocalyx* y en forma las diferencias son significativa, no obstante *E. cladocalyx* tiene un IMA en altura mayor y con diferencias significativas a *E. camaldulensis*. Se destaca a nivel de progenies individuales las selecciones de secano efectuadas en Ovalle, Coquimbo (progenie S-73), con un crecimiento de 7,51 metros y de Peralillo, O'Higgins, con un DAP de 74,1 mm a los 30 meses de edad.

El sistema reproductivo de los eucaliptos ofrece amplias oportunidades para la autopolinización (Griffin y Hand, 1979; Eldridge *et al.*, 1993) y esta tiene efectos negativos en la cantidad de semillas a obtener por cápsula, el porcentaje de germinación en vivero, en la frecuencia de fenotipos anormales y el vigor, y en la supervivencia y el crecimiento de las plantas en terreno.

Al considerar este ultimo aspecto y los resultados obtenidos al hibridar *E. globulus* de alta productividad proveniente de zonas sin restricciones hídricas con *E. globulus* proveniente de zonas marginales con severas condiciones de sequía, aparece la polinización controlada como una herramienta para la generación de material genético de *E. globulus* tolerante a la sequía.

El traspaso de la tolerancia a la sequía de padre a hijos queda en evidencia al comparar las progenies de *E. globulus* de Alta productividad (polinización abierta) con la población de polinización controlada, la cual presenta mayor crecimiento y supervivencia. También esta población presenta una gran variabilidad en cuanto a supervivencia, denotando que existen combinaciones específicas superiores al seleccionar padre y madre.

CONCLUSIONES

Al comparar las progenies de polinización abierta de *E. globulus* definidas en los grupos de alta productividad y de secano, en ambos ensayos las segundas tuvieron una mayor supervivencia, pero con valores muy cercanos a las primeras.

Analizando Altura, DAC e IMA en Altura, se concluye que las progenies de polinización controlada (Híbridos Intraespecíficos F₁) son significativamente diferentes y superiores en todas las variables evaluadas a las progenies de polinización abierta, incluyendo al control de *E. globulus* comercial (Los Hermanos) y *E. camaldulensis*.

El material genético de alta productividad y la semilla comercial tradicional de *E. globulus* no presentan un buen desempeño en relación a las variables de crecimiento inicial en sitios con mayores restricciones hídricas para la especie.

La procedencia King Island tuvo buenos resultados en tolerancia a sequía en relación a las otras procedencias australianas.

Existe una gran variabilidad en los resultados que arrojan las combinaciones de madres de alta productividad con padres de secano. Por ejemplo el clon con el mayor ranking genético de los ensayos de progenies antiguos de INFOR (A-33) no es una buena madre cuando se le combina con polen de árboles superiores en tolerancia a la sequía, incluso esta combinación es inferior a la semilla generada exclusivamente por individuos de alta productividad en polinización abierta.

REFERENCIAS

- Booth, T. y Pryor L., 1991.** Climatic requirements of some commercially important Eucalypt species Forest Ecology and Management 43(1991)
- Caldentey y Pizarro, 1980.** Evaluación y zonificación de los recursos climáticos de la IV Región de Chile. Memoria (Ingeniero Forestal). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.
- Caldentey, 1987.** Evaluación y Zonificación de los Recursos Climáticos de la IV Región de Chile, cartografía a escala 1:500.000; y Distritos Agroclimáticos de la IV Región.
- Cauvin B (1988).** Pistil treatments for improved fertility in hybridization of *E. gunnii* (Hook). In sexual reproduction in Higher plants: proceedings of the 10th International Symposium on the sexual reproduction of the high plants, 30th May to 4th June 1988. University of Siena, Siena, Italy. (Ed. PG M. Cresti, E. Pacini) pp 321-325 (Spirnger-Verlag, Berlin).
- Dutkowski, G. 1995 .** Genetic variation in drought susceptibility of *Eucalyptus globulus ssp globulus* in plantations in Western Australia. In : Potts BM, Borralho NMG, Reid JB, Cromer RN, Tibbits WN, Raymond CA (eds) Eucalypt plantations: Improving the fibre yield and quality. CRC for Temperate Hardwood Forestry, Hobart, Tasmania, pp 199-203
- Dutkowski GW, Potts BM (1999)** Geographical patterns of genetic variation in *Eucalyptus globulus ssp. globulus* and a revised racial classification. Aust J Bot 46:237–263
- Dutkowski GW, Potts BM, Borralho NMG (1997)** Revised racial classification of *Eucalyptus globulus ssp. globulus* and the importance of including race in analysis of progeny trials. IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalypts. EMBRAPA, Colombo, Salvador, Bahia, Brazil, pp 322–329
- Eldridge K.G. , Davidson J., Van Vick, 1993.** Eucalypt domestication and breeding. Clarendon Press. Oxforr.
- Espejo J.E, England NF, Griffin A.R., 1995.** Results of a crossing program with *Eucalyptus nitens* and *E. globulus* in Chile. In: Potts BM, Borralho NMG, Reid JB, Cromer RN, Tibbits WN, Raymond CA (eds)'Eucalypt plantations: improving fibre yield and quality' proc CRCTHF-IUFRO Conf, Hobart, 19–24 Feb. CRC for Temperate Hardwood Forestry, Hobart, Tasmania, pp 239–240
- FIA, 2010.** El cambio climático en el sector silvoagropecuario chileno.
- Griffin, A.R. y Hand, F.C. 1978.** Post anthesis development of flowers of *Eucalyptus regnans* and the timing of artificial pollination. Australian Forest Research. 9:9-15
- INFOR, 1998.** Sistema de gestión forestal para la modernización de pequeños agricultores.
- INFOR, 2011.** El cambio climático los bosques y la silvicultura. Editores Roberto Ipinza Carmona y Santiago Barros Asenjo.
- INFOR. 2012.** Anuario Forestal 2012. Boletín Estadístico N° 136. Editor: Daniel Soto A., Santiago Chile, 138 páginas.
- Potts, B.M. y Dutkowski, 2012.** Genetic variation in the susceptibility of *Eucalyptus globulus* to drought damage. Tree genetics & genomes. Springer.
- Roberts, R. C. y Díaz V., C., 1959/60.** Agricultura Técnica, Año XIX-XX.
- Rojas Vergara, P. M, Griffin A. R., 1997.** Fibre Yield Improvement Program (FYIP) of *E. globulus* Labill in Santa Fe Group. In Proceedings of the IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of *Eucalyptus*. Salvador, Brasil. Pp 206-211
- Rojas Vergara P, Ramirez de Arellano P, Contardo C, Balocchi C, Potts B. M, 2001.** Desarrollo de una metodología para la producción de semilla híbrida intra e interespecifica en un huerto semillero clonal de *Eucalyptus globulus*. Developing the Eucalypt of the Future, p 88

Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003 Subdirección Nacional de Geología Mapa Geológico de Chile: Versión Digital. Publicación *Geológica Digital*, No. 4, 2003 CD-ROM, versión 1.0, Base Geológica escala 1:1.000.000

Toro, M.A., Silió, L., Rodríguez, M.C., Soria, F. y Toval, G. 1998. Genetic analysis of survival and growth in *E. globulus* in Spain. Proc 6th world Congress on Genetics applied to livestock production. Armidale, Australia. Volume 27. 27: 499-502.

Williams D. R, Potts B. M., Black P. G., 1999. Testing single visit pollination procedures for *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*. Australian Forestry 62, 346-352



Anexo N° 1. MATERIAL GENÉTICO VIVERIZADO PARA LAS PRUEBAS DE PROGENIES DE POLINIZACIÓN ABIERTA

Especie	Lote o Código	Origen	Región	Observaciones
<i>E. globulus</i>	S-3	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-5	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-7	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-12	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-14	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-15	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-16	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-20	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-22	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-23	La Estrella	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-24	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-25	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-26	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-27	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-28	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-29	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-30	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-33	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-34	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-36	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-37	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-39	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-40	Peralillo	O'Higgins	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-41	Casablanca	Valparaíso	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-42	Casablanca	Valparaíso	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-52	Casablanca	Valparaíso	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-54	Casablanca	Valparaíso	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-56	Casablanca	Valparaíso	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-57	Cauquenes	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-61	San Javier	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-62	San Javier	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-63	San Javier	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-66	San Javier	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-67	San Javier	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-69	San Javier	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-70	San Javier	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-71	Ovalle	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-72	Ovalle	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-73	Ovalle	Coquimbo	Plus Secano

Especie	Lote o Código	Origen	Región	Observaciones
<i>E. globulus</i>	S-74	Ovalle	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-79	Ovalle	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-80	Ovalle	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-81	Ovalle	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-86	Ovalle	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-88	La Serena	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-89	La Serena	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-90	La Serena	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-91	La Serena	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-92	La Serena	Coquimbo	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-94	Zapallar	Valparaíso	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-96	Zapallar	Valparaíso	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-100	Ninhue	Bio Bio	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-101	Chanco	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-104	Chanco	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-105	Chanco	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-106	Chanco	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	S-107	Chanco	Maule	Plus Secano
<i>E. globulus</i>	A-1	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-2	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-5	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-6	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-7	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-11	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-13	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-15	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-20	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-25	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-26	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-33	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. globulus</i>	A-16	Clon HSC Agromen		Plus Alta Productividad
<i>E. camaldulensis</i>	Lote	APS, Lolol	O'Higgins	Conjunto de árboles
<i>E. cladocalyx</i>	Lote	EPA, Tunga Norte	Coquimbo	Árboles seleccionados

HSC, Huerto Semillero Clonal

APS, Área Productora de Semillas

EPA, Ensayo de Progenies de Polinización Abierta

Anexo N° 2. MATERIAL GENÉTICO DISPONIBLE PARA EL ESTABLECIMIENTO DE ENSAYO DE PROGENIES DE POLINIZACIÓN CONTROLADA

Madres		Padres					Cruza (progenie de polinización controlada)
Huerto Clonal AGROMEN		Selección de progenitores en zonas de secano desde IV a VIII Regiones					
Clon	Ensayo	Clon	Región	Provincia	Comuna	Predio	Código Asignado
5	Los Copihues	22	O'Higgins	Cardenal Caro	La Estrella	Pailimo	PC 1
5	Los Copihues	70	Maule	Talca	San Javier	S. Baldomero	PC 2
5	Los Copihues	72	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 3
5	Los Copihues	80	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 4
5	Los Copihues	83	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 5
5	Los Copihues	86	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 6
5	Los Copihues	89	Coquimbo	Coquimbo	La Serena	San José	PC7
5	Los Copihues	MIX-2	varias				PC8
7	Los Copihues	70	Maule	Talca	San Javier	S. Baldomero	PC9
7	Los Copihues	80	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC10
15	Los Hermanos	70	Maule	Talca	San Javier	S. Baldomero	PC11
15	Los Hermanos	72	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 12
15	Los Hermanos	80	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 13
15	Los Hermanos	83	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 14
15	Los Hermanos	MIX-2	Varias				PC15
26	Los Hermanos	70	Maule	Talca	San Javier	S. Baldomero	PC 16
26	Los Hermanos	80	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 17
26	Los Hermanos	83	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 18
26	Los Hermanos	MIX-2	Varias				PC 19
32	Tanumé	22	O'Higgins	Cardenal Caro	La Estrella	Pailimo	PC 20
32	Tanumé	70	Maule	Talca	San Javier	S. Baldomero	PC 21
32	Tanumé	80	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 22
32	Tanumé	83	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 23
32	Tanumé	86	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 24
32	Tanumé	89	Coquimbo	Coquimbo	La Serena	San José	PC 25
32	Tanumé	MIX-2	Varias				PC 26
33	Tanumé	83	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 27
40	San Agustín	72	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 28
40	San Agustín	83	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 29
40	San Agustín	86	Coquimbo	Limarí	Ovalle	V.de Punilla	PC 30
5	Los Copihues	PA	PA Huerto Clonal INFOR-Agromen				PA 5
7	Los Copihues	PA	PA Huerto Clonal INFOR-Agromen				PA 7
15	Los Hermanos	PA	PA Huerto Clonal INFOR-Agromen				PA 15
26	Los Hermanos	PA	PA Huerto Clonal INFOR-Agromen				PA 26
32	Tanumé	PA	PA Huerto Clonal INFOR-Agromen				PA 32
33	Tanumé	PA	PA Huerto Clonal INFOR-Agromen				PA 33
40	San Agustín	PA	PA Huerto Clonal INFOR-Agromen				PA 40

MIX2: Mezcla de polen de clones 70, 72, 81 y 89

PA, Polinización natural (abierto) Huerto Clonal INFOR-Agromen

Anexo 3. AGRUPACIÓN DE LAS PROGENIES DE POLINIZACIÓN ABIERTA (PA)

Clasificación	Categorías
GRUPO GENERAL	Progenies de Secano
	Progenies de Alta Productividad
	<i>E. camaldulensis</i>
	<i>E. cladocalyx</i>
Clasificación	Categorías
Zona Climática	Secano Costero, Coquimbo
	Secano Interior, Coquimbo
	Secano Costero, Valparaíso
	Secano Interior, Valparaíso
	Secano Costero, O'Higgins
	Secano Interior, O'Higgins
	Secano Costero, Maule
	Secano Interior, Maule
	Secano Costero, Bio Bio
	Tasmania AUS
	Victoria AUS

Clasificación	Categorías
Procedencias	La Serena, Coquimbo
	Ovalle, Coquimbo
	Tunga Norte, Coquimbo
	Zapallar, Valparaíso
	Casablanca, Valparaíso
	La Estrella, O'Higgins
	Peralillo, O'Higgins
	Lolol, O'Higgins
	San Javier, Maule
	Chanco, Maule
	Cauquenes, Maule
	Ninhue, Bio Bio
	Sw Apollo Bay, Vic, AUS
	W Kennett River, Vic, AUS
	Jeeralang North, Vic, AUS
	King Island, Tas, AUS
	Moogara, Tas, AUS
	Central Flinders Island, Tas, AUS
	Badgers Ck Quarry, Tas, AUS



Anexo 4. AGRUPACIÓN DE PROGENIES EN ENSAYOS DE POLINIZACIÓN CONTROLADA

Clasificación	Categorías	Clasificación	Categorías
GRUPO	<i>E. camaldulensis</i>	Zona Climática Madre	Costa, Bio Bio
	<i>E. globulus</i> Los Hermanos		Secano Interior, O'Higgins.
	Progenies de Polinización Controlada		Tasmania
	Progenies de Polinización Abierta		Victoria
MADRE	A-05: Clon 5, Huerto Clonal INFOR-Agromen	Origen Geográfico Madre	Antihuala, Bio Bio
	A-07: Clon 7, Huerto Clonal INFOR-Agromen		Central Flinders Island, TAS
	A-15: Clon 15, Huerto Clonal INFOR-Agromen		Jeeralang North, VIC
	A-26: Clon 26, Huerto Clonal INFOR-Agromen		King Island, TAS
	A-32: Clon 32, Huerto Clonal INFOR-Agromen		Lolol, O'Higgins
	A-33: Clon 33, Huerto Clonal INFOR-Agromen		Moogara, TAS
	A-40: Clon 40, Huerto Clonal INFOR-Agromen		Sw Apollo Bay, VIC
	APS LH: APS Los Hermanos		SW of Cape Barren Island, TAS
	<i>Camaldulensis</i> : Lote semillas APS Lolol O'Higgins		
Clasificación	Categorías	Clasificación	Categorías
PADRE	<i>E. camaldulensis</i> : Lote semillas APS Lolol O'Higgins	Zona Climática del Padre	Costa, Bio Bio
	<i>E. globulus</i> LH: APS Los Hermanos		Secano Costero, Coquimbo
	MIX2: mezcla polen árboles de secano (70, 72, 81 y 89		Secano Costero, O'Higgins
	PA LH: Polinización abierta en APS Los Hermanos		Secano Interior, Coquimbo
	PA-HC: Polinización abierta en Huerto Clonal		Secano Interior, O'Higgins
	S-22: Plus de Secano		Secano Interior, Maule
	S-70: Plus de Secano		Secano Interior, Bio Bio
	S-72: Plus de Secano	Origen Geográfico Padre	Antihuala, Bio Bio
	S-80: Plus de Secano		Confluencia, Bio Bio
	S-83: Plus de Secano		La Estrella, O'Higgins
	S-86: Plus de Secano		La Serena, Coquimbo
	S-89: Plus de Secano		Lolol, O'Higgins
			Ovalle, Coquimbo
			San Javier, Bio Bio



16. EVALUACIÓN DE SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO INICIAL DE ESPECIES MENORES DE *Eucalyptus* Y *Corymbia* BAJO CONDICIONES DE ARIDEZ

Braulio Gutiérrez C.¹

María Paz Molina B.²

Santiago Barros A.³

INTRODUCCIÓN

Diversas especies han sido sugeridas como apropiadas para la forestación en zonas áridas, entre ellas algunos eucaliptos han demostrado su adaptabilidad para sobrevivir y desarrollarse bajo tales limitaciones, siendo *Eucalyptus camaldulensis* la especie más difundida con ese fin.

No obstante lo anterior, existen otras especies del mismo género que también presentan un gran potencial para satisfacer el mismo objetivo.

Consecuentemente, en el presente capítulo se evalúa y compara el comportamiento y desempeño temprano de distintas especies de *Eucalyptus* (*E. camaldulensis*, *E. cladocalyx*, *E. sideroxylon*, *E. diversicolor*, *E. tricarpa* y *E. tereticornis*), y de *Corymbia maculata* (antes *Eucalyptus maculata*), establecidos en plantaciones experimentales en distintos sectores representativos de las zonas áridas de la Región de Coquimbo.

Considerando que *E. camaldulensis* es una especie reconocida por su capacidad para desarrollarse en áreas con precipitación limitada, el objetivo de esta evaluación es comparar su desempeño, en términos de supervivencia y crecimiento inicial, con el de otras especies sugeridas para establecer plantaciones bajo tal limitación ambiental, e idealmente identificar algunas que exhiban un desempeño similar, de modo que constituyan alternativas potencialmente aptas para complementar a *E. camaldulensis* en la forestación de zonas áridas y semiáridas.

MATERIAL Y MÉTODO

Ensayos

Para determinar el material genético más adecuado para establecer plantaciones en zonas áridas se evaluó un conjunto de tres ensayos (Caracas, Huentelauquén y Tunga Norte) establecidos entre los años 2005 y 2006 en la Región de Coquimbo, los que contemplan diversas especies de *Eucalyptus* y una especie de *Corymbia* recomendadas para zonas áridas.

1 Ingeniero Forestal. Investigador Sede Bio Bio INFOR. bgutierr@infor.cl

2 Ingeniero Forestal. Magister en Ciencias Forestales. Investigadora Sede Bio Bio INFOR. mmolina@infor.cl

3 Ingeniero Forestal U. de Chile. Instituto Forestal. Dirección Ejecutiva. sbarros@infor.cl

Los ensayos considerados, las especies incluidas y el número de progenies de cada una se detallan en el Cuadro N° 1.

Los tres ensayos tienen un diseño de bloques completos al azar. Caracas posee 18 bloques en los que se representan 50 progenies en parcelas de un árbol individual; Tunga Norte comprende 4 bloques donde se representan 135 progenies en parcelas lineales de cuatro plantas cada una; Huentelauquén considera 12 bloques donde se presentan 49 progenies en parcelas lineales de 3 plantas cada una.

Cuadro N° 1
NÚMERO DE PROGENIES DE LAS DISTINTAS ESPECIES EN LOS ENSAYOS EVALUADOS

Especies	Ensayos		
	Caracas (2005)	Tunga Norte (2006)	Huentelauquén (2006)
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	22	20	22
<i>E. cladocalyx</i>	18	17	17
<i>E. sideroxylon</i>	6	40	6
<i>E. tereticornis</i>	4	-	4
<i>E. diversicolor</i>	-	3	-
<i>E. tricarpa</i>	-	50	-
<i>Corymbia maculata</i>	-	5	-
Total	50	135	49

El ensayo de la Hacienda Caracas fue establecido en el año 2005, en la Comuna de los Vilos, Región de Coquimbo. Se encuentra en terrenos correspondientes a planicies litorales donde predomina un clima de estepa con nubosidad abundante y oscilaciones térmicas bajas debido al efecto moderador del mar. Las precipitaciones se concentran en más de un 80% en los meses invernales exhibiendo un periodo seco prolongado.

El ensayo Tunga Norte se estableció el año 2006 en terrenos de la comunidad agrícola del mismo nombre, en la Comuna de Illapel, Región de Coquimbo. El suelo corresponde a un aridsol de origen granítico y de transición entre pardos cálcico a pardos no cálcicos. El clima imperante en el área es del tipo mediterráneo árido, caracterizado por una precipitación invernal promedio de 220 mm anuales y un largo periodo seco de 8 a 11 meses.

El ensayo Huentelauquén se estableció el año 2006 en la Comuna de Canela, Región de Coquimbo, en una condición de clima mediterráneo árido con nubosidad abundante, precipitación anual cercana a los 200 mm y periodo seco prolongado.

Especies

***Eucalyptus camaldulensis*:** Es uno de los eucaliptos más difundido en plantaciones fuera de Australia. Posee una gran distribución natural asociada a cursos de agua y se le reconoce como una especie capaz de desarrollarse en ambientes áridos. Es una especie heliófita que requiere plena exposición para un crecimiento satisfactorio. En el área de distribución natural se le encuentra en zonas desde 200 a 1.250 mm anuales de precipitación. La especie puede crecer bien en zonas de precipitación

menores a 400 mm, si cuenta con inundaciones estacionales o una napa freática alta. El mínimo de precipitación para plantaciones comerciales es de 400 mm. No obstante, se ha desarrollado bien en regiones con menos de 300 mm de lluvia al año y sin inundaciones.

***Eucalyptus cladocalyx*:** Es una especie originaria del sur de Australia donde se distribuye en áreas con clima predominantemente mediterráneo, con lluvias invernales, un largo período seco y precipitaciones anuales que varían entre 380 y 630 mm. De acuerdo con distintas experiencias, esta especie podría ser buena alternativa en zonas con 200 a 300 mm de precipitación, es decir, en la Región de Coquimbo. Además, podría reemplazar a *Eucalyptus camaldulensis* en áreas con una precipitación algo mayor, pero con suelos de muy baja fertilidad.

***Eucalyptus sideroxylon*:** Es una especie de distribución amplia pero esporádica, que crece en forma natural en el sudeste de Queensland, en las laderas occidentales y planicies de Nueva Gales del Sur y en zonas de Victoria central. Generalmente se desarrolla en suelos pobres, con 4 a 7 meses secos y precipitaciones que fluctúan entre 400 y 1000 mm anuales. Fuera de su rango de distribución natural ha sido exitoso para sobrevivir en lugares con menos de 400 mm.

***Eucalyptus diversicolor*:** Especie de tamaño medio a grande, originaria de zonas lluviosas del suroeste de Western Australia, donde crece en terrenos con 900 a 1.300 mm de precipitación anual.

***Eucalyptus tricarpa*:** Es una especie endémica de Victoria y la costa sur de Nueva Gales del Sur en Australia. Originalmente se clasificaba como *E. sideroxylon ssp tricarpa*, pero se la separó de esa especie debido al mayor tamaño de sus frutos y a su distribución preferente en áreas próximas a la costa. En su distribución natural forma parte de bosques esclerófilos sobre suelos muy pobres.

***Eucalyptus tereticornis*:** Es una especie de bosque abierto que se distribuye en una amplia faja por el costado oriental de Australia, donde enfrenta precipitaciones que fluctúan entre 500 y 1000 mm anuales, en diferentes tipos de clima, que varían latitudinalmente desde monsónico en el norte; mediterráneo en Queensland; precipitación homogénea durante todo el año en el Sur de Nueva Gales del Sur; hasta inviernos fríos y húmedos al este de Victoria. En plantaciones ha sido extensamente difundida, ocupando sitios con precipitaciones que fluctúan desde menos de 400 a más de 3.000 mm anuales, sobre suelos arcillosos y de arena. Los mejores crecimientos se observan en suelos profundos, bien drenados, neutros o ligeramente ácidos, donde recibe precipitaciones de entre 800 y 1.500 mm al año.

***Corymbia maculata*:** Originalmente clasificada en el género *Eucalyptus*, fue reclasificada como *Corymbia* por Hill y Johnson en 1995. Es una especie de árbol dominante en los bosques abiertos de Queensland, Nueva Gales del Sur y Victoria, donde crece en suelos infértiles y lugares secos, asociada a suelos con presencia de esquistos y pizarras. Se la menciona como apropiada para áreas de clima templado a tropical, pero también puede crecer satisfactoriamente en zonas más secas si tiene agua disponible, adaptándose a un amplio rango de suelos excepto a aquellos que se inundan.

Método

Se utilizó información proveniente de la medición 2009 de los ensayos indicados en el Cuadro N° 1, tres años de edad para la plantación de Caracas y dos años para Tunga Norte y Huentelauquén.

Las mediciones registraron el crecimiento en altura (ALT) y diámetro de cuello (DAC), valores que fueron analizados mediante procedimientos estadísticos descriptivos y de análisis de varianza. Como parámetro complementario se analizó también el comportamiento de la variable supervivencia (SUP).

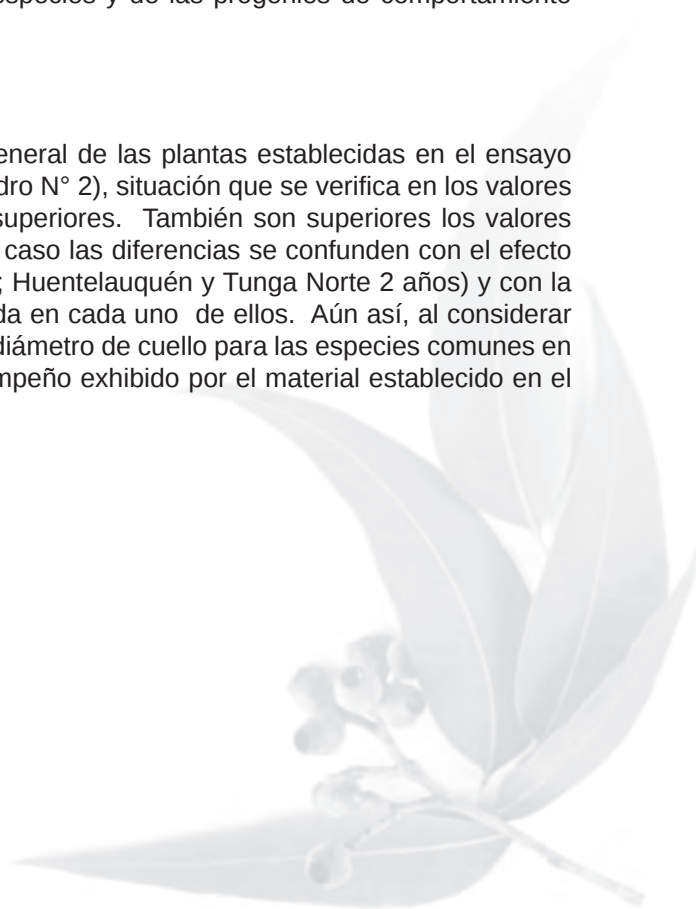
Para efecto de determinar las medias de supervivencia se consideró a todas las plantas vivas, independiente de su estado, mientras que para determinar las medias de altura, las bases de datos fueron depuradas usando la información de estado, para eliminar del promedio a las plantas dañadas.

Los resultados obtenidos se presentan y comparan en tablas y gráficos donde se presentan los valores absolutos de cada variable a nivel de especies y ensayos.

Para efectos de hacer comparaciones más objetivas, reduciendo el efecto de la diferencia de edad entre ensayos, y como medida para ilustrar la variación intraespecífica entre las progenies consideradas para cada especie, se calculan y grafican los incrementos medios anuales de crecimiento a nivel de especies y de las progenies de comportamiento extremo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se observa un mejor desempeño general de las plantas establecidas en el ensayo Caracas respecto de los dos restantes (Cuadro N° 2), situación que se verifica en los valores de supervivencia que resultan claramente superiores. También son superiores los valores de altura y diámetro de cuello, pero en este caso las diferencias se confunden con el efecto de la edad de los ensayos (Caracas 3 años; Huentelauquén y Tunga Norte 2 años) y con la distinta composición de especies considerada en cada uno de ellos. Aún así, al considerar los incrementos medios anuales de altura y diámetro de cuello para las especies comunes en los tres ensayos se confirma el mejor desempeño exhibido por el material establecido en el ensayo de Caracas (Cuadro N° 3)



Cuadro N° 2
RESUMEN DEL DESEMPEÑO DE DISTINTAS ESPECIES FORESTALES EN TRES ENSAYOS ESTABLECIDOS
EN DISTINTAS LOCALIDADES DE LA IV REGIÓN

Especies	ENSAYOS								
	Caracas			Huentelauquén			Tunga Norte		
	SUP (%)	ALT (cm)	DAC (mm)	SUP (%)	ALT (cm)	DAC (mm)	SUP (%)	ALT (cm)	DAC (mm)
<i>E. camaldulensis</i>	84,6	234,3 ^a	43,9 ^a	65,2	98,6 ^a	14,1 ^b	66,9	118,2 ^a	22,5 ^b
<i>E. cladocalyx</i>	87,7	243,3 ^a	44,6 ^a	51,4	97,8 ^a	17,8 ^a	22,8	117,2 ^a	27,8 ^a
<i>E. sideroxylon</i>	91,7	239,3 ^a	44,8 ^a	44,3	72,1 ^b	11,6 ^c	45,0	80,1 ^b	13,7 ^d
<i>E. tereticornis</i>	81,9	238,9 ^a	43,8 ^a	52,0	72,4 ^b	11,7 ^c			
<i>E. diversicolor</i>							60,4	96,3 ^a	20,7 ^b
<i>E. tricarpa</i>							45,3	106,2 ^a	17,8 ^c
<i>C. maculata</i>							41,3	117,4 ^a	21,2 ^b
Promedio	86,3	239,2	44,4	56,8	94,3	15,0	45,7	102,0	18,5

Letras Superíndices distintas en una misma columna indican diferencia estadísticamente significativas según prueba de Scott y Knott para $\alpha = 0,05$

Cuadro N° 3
INCREMENTOS MEDIOS ANUALES EN ALTURA Y DIÁMETRO DE CUELLO
DE LAS ESPECIES COMUNES EN LOS TRES ENSAYOS EVALUADOS

Especies	ENSAYOS					
	Caracas		Huentelauquén		Tunga Norte	
	ALT (cm/año)	DAC (mm/año)	ALT (cm/año)	DAC (mm/año)	ALT (cm/año)	DAC (mm/año)
<i>E. camaldulensis</i>	78,1	14,6	49,3	7,1	59,1	11,3
<i>E. cladocalyx</i>	81,1	14,9	48,9	8,9	58,6	13,9
<i>E. sideroxylon</i>	79,8	14,9	36,1	5,8	40,1	6,9
Promedio	79,7	14,8	44,8	7,3	52,6	10,7

Las mejores supervivencias y crecimientos observados en el primer ensayo obedecen a condiciones ambientales más favorables, particularmente la cercanía al mar y el efecto de neblinas costeras, lo que permite que las tres especies puedan manifestar un comportamiento muy similar. En los ensayos restantes, las condiciones más adversas limitan el desarrollo de las especie menos adaptadas a condicione de aridez, haciendo manifiesta la diferencias entre ellas (Cuadro N° 2).

En general se observa que en las condiciones más severas de Huentelauquén y Tunga Norte, *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx* continúan manifestando los mejores crecimientos, mientras que *E. sideroxylon*, *E. tereticornis*, *E. tricarpa* y *E. diversicolor* presentan valores menores. También se destaca el buen desarrollo de *Corymbia maculata*, que resulta muy similar al de las especies de mejor desempeño.

Los resultados obtenidos a nivel de especies son en general coincidentes con los existentes en publicaciones anteriores. En efecto Smith (1997) ya señalaba el adecuado comportamiento en supervivencia y crecimiento experimentado por *E. camaldulensis* en suelos costeros del sur de la Región de Coquimbo, identificando además una interesante

variabilidad de comportamiento entre procedencias. Por su parte Parra y Chung (1997), evaluando ensayos de progenies de *E. cladocalyx* de 31 meses de edad, en la zona de Los Vilos, Región de Coquimbo, reconocen el potencial y adecuado desempeño exhibido por esta especie. Estos mismos autores señalan que en esas condiciones *E. sideroxylon* exhibe un comportamiento inferior al de *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx*, situación que es consistente con la observada en la evaluación que se presenta en este capítulo.

En cuanto a la potencialidad de *E. cladocalyx* como especie alternativa o complementaria a *E. camaldulensis* en zonas mediterráneas áridas y semiáridas, esta queda de manifiesto en la evaluación efectuada, así como en los antecedentes señalados por Parra y Chung (1997). Sobre este particular, Serradilla (2000) hace notar que aunque *E. cladocalyx* puede tener un crecimiento inicial más lento que el de *E. camaldulensis*, ha demostrado una alta productividad, incluso superior a la de *E. camaldulensis*; adicionalmente exhibe mayor resistencia a sequía y a *Phoracanta semipunctata*, aunque también una mayor vulnerabilidad al frío; por otra parte ofrece una abundante floración complementaria a la de *E. camaldulensis*, lo que sugiere la utilización combinada de ambas especies con fines de aprovechamiento apícola.

Así mismo, a nivel de especies, los resultados publicados por King y Krugman (1980) coinciden con esta evaluación en cuanto al buen desempeño en crecimiento y supervivencia de *E. camaldulensis*. Sin embargo, respecto de *E. sideroxylon* y *E. diversicolor* plantean resultados distintos a los obtenidos en esta evaluación. En efecto, para *E. sideroxylon* indican una supervivencia del 100% a los tres años de edad, valor que resulta similar al registrado por esta especie en el ensayo Caracas (91,7%), pero muy superior al obtenido en Huentelauquén y Tunga Norte, donde solo logró valores próximos al 45%. Respecto de *E. diversicolor*, los mismos autores lo clasifican como un fracaso tras obtener una nula supervivencia, mientras que en el ensayo evaluado en Chile (Huentelauquén) la especie registró una mortalidad inferior al 40%.

Resultados por Ensayo

- Ensayo Caracas

Las cuatro especies evaluadas en el ensayo Caracas a la edad de tres años presentan un comportamiento muy similar. En efecto, el análisis de varianza indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre progenies dentro de las especies, pero que entre las especies esta diferencia no existe, de modo que las cuatro forman un mismo grupo homogéneo de acuerdo a los resultados de tres pruebas de comparaciones múltiples de medias (Duncan, Tuckey y Scott y Knott).

Los valores medios del ensayo en su conjunto para las variables analizadas fueron: Supervivencia 86,3%; Altura 239,2 cm; y DAC 44,4 mm. El comportamiento a nivel de especies se presenta en la Figura N° 1, la cual da cuenta del similar comportamiento de las cuatro especies evaluadas.

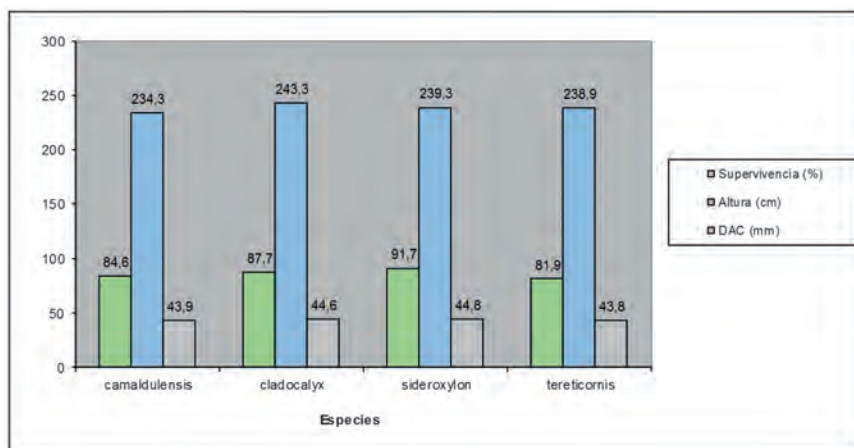


Figura N° 1
VALORES MEDIOS DE SUPERVIVENCIA, ALTURA Y DIÁMETRO DE CUELLO
TRES AÑOS EDAD. ENSAYO CARACAS. LOS VILOS, REGIÓN DE COQUIMBO

Los valores de supervivencia registrados en Caracas para cuatro especies de *Eucalyptus* fluctúan entre 82 y 92%, resultando similares a los mencionados por Gutiérrez y Chung (1993) y Alvear y Gutiérrez (1995) para 4 ensayos de progenies de *E. camaldulensis* establecidos entre las regiones de Valparaíso y O'Higgins (Cuadro N° 4).

Respecto a las variables de crecimiento en altura y DAC, estas resultan menores en los eucaliptos del ensayo Caracas que en los de *E. camaldulensis* de los cuatro ensayos detallados en el Cuadro N° 4. Tal diferencia obedece a la diferencia de edad de los ensayos comparados, mientras que en el caso del ensayo Tantehue su mayor desarrollo corresponde a las condiciones más favorables del sitio y al origen selecto de las procedencias consideradas en su establecimiento.

Cuadro N° 4
SUPERVIVENCIA ALTURA Y DIÁMETRO DE CUELLO EN CUATRO ENSAYOS DE
PROGENIES DE *E. camaldulensis* EVALUADOS A LA EDAD DE 42 a 44 MESES

Variables	Ensayos			
	Mel Mel Casablanca Valparaíso	Longotoma La Ligua Valparaíso	Tantehue Melipilla Metropolitana	La Paila Colchagua O'Higgins
Supervivencia (%)	83,3	93,2	96,9	78,1
Altura (cm)	338,0	328,0	659,0	257,0
DAC (mm)	58,1	52,4	-	-

(Fuente: Alvear y Gutiérrez, 1995)

Para cada una de las especies consideradas en el ensayo Caracas se observa un grado variable de diferenciación entre sus progenies, situación que se describe y comenta en el apartado siguiente, de resultados por progenies.

- Ensayo Huentelauquén

En este ensayo se consideran las mismas especies que en el recientemente descrito de Caracas, pero a diferencia de aquel, en este caso se observan un comportamiento distinto de las especies ensayadas (Figura N° 2).

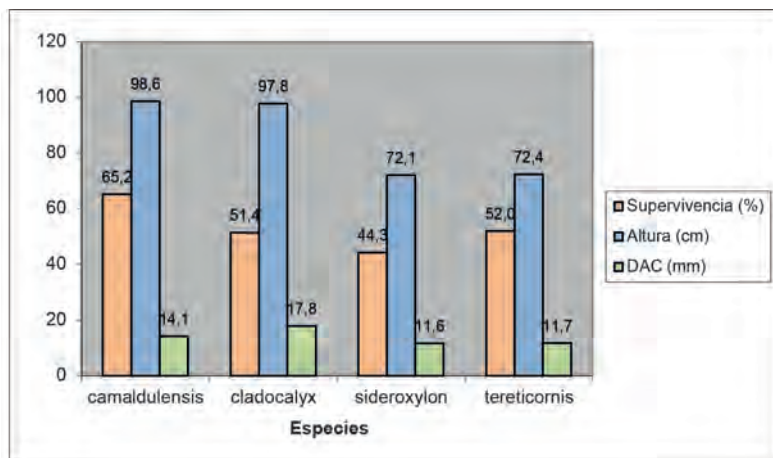


Figura N° 2
VALORES MEDIOS DE SUPERVIVENCIA, ALTURA Y DIÁMETRO DE CUELLO
EDAD DOS AÑOS, ENSAYO HUENTELAUQUÉN. CANELA, REGIÓN DE COQUIMBO

El análisis de varianza y prueba de comparaciones múltiples de medias (Scott y Knott, α : 0,05) indica que para la altura existen dos grupos con un desempeño estadísticamente diferente. *E. tereticornis* y *E. sideroxylon* conforman un grupo con altura significativamente menor a la del grupo compuesto por *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx*. En el caso del diámetro de cuello se observa una situación similar; *E. cladocalyx* y *E. tereticornis* forman el grupo de menor valor, *E. camaldulensis* un valor intermedio y *E. cladocalyx* el mayor de las cuatro especies evaluadas (Figura N° 2).

La situación anterior confirma antecedentes previos respecto al adecuado desarrollo de *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx* respecto a otras especies alternativas para forestar en zonas áridas.

Para cada una de las especies consideradas en el ensayo Huentelauquén se observa un grado variable de diferenciación entre sus progenies. Esta situación se describe en el apartado siguiente, de resultados por progenies.

- Ensayo Tunga Norte

Este ensayo también evidencia un distinto comportamiento de las especies ensayadas, destacándose al igual que en las unidades anteriores, el desempeño alcanzado por *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx*, los cuales junto a *Corymbia maculata* alcanzan los mejores valores de altura y diámetro de cuello. Por el contrario, *E. sideroxylon* vuelve a presentar los valores más bajos en ambas variables, tal como se observó en el ensayo Huentelauquén (Figura N° 3).

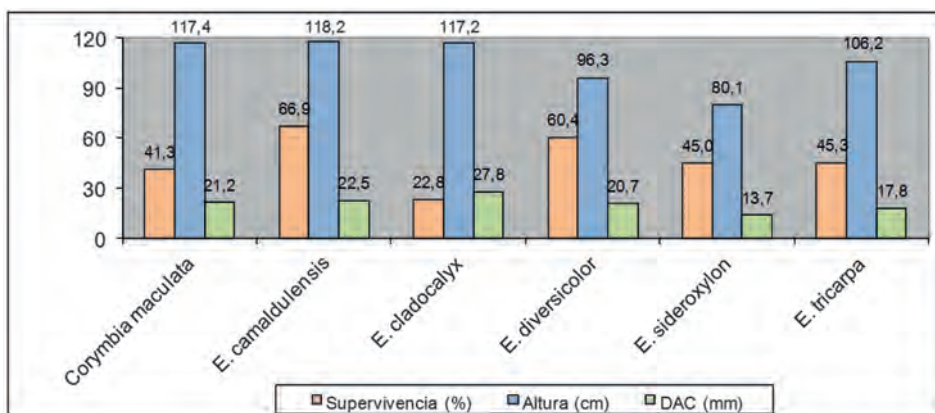


Figura N° 3
VALORES MEDIOS DE SUPERVIVENCIA, ALTURA Y DIÁMETRO DE CUELLO
EDAD DOS AÑOS, ENSAYO TUNGA NORTE. ILLAPEL, REGIÓN DE COQUIMBO

Para cada una de las especies consideradas en el ensayo Tunga Norte se observa un grado variable de diferenciación entre sus progenies. Esta situación se describe en el apartado siguiente, de resultados por progenies.

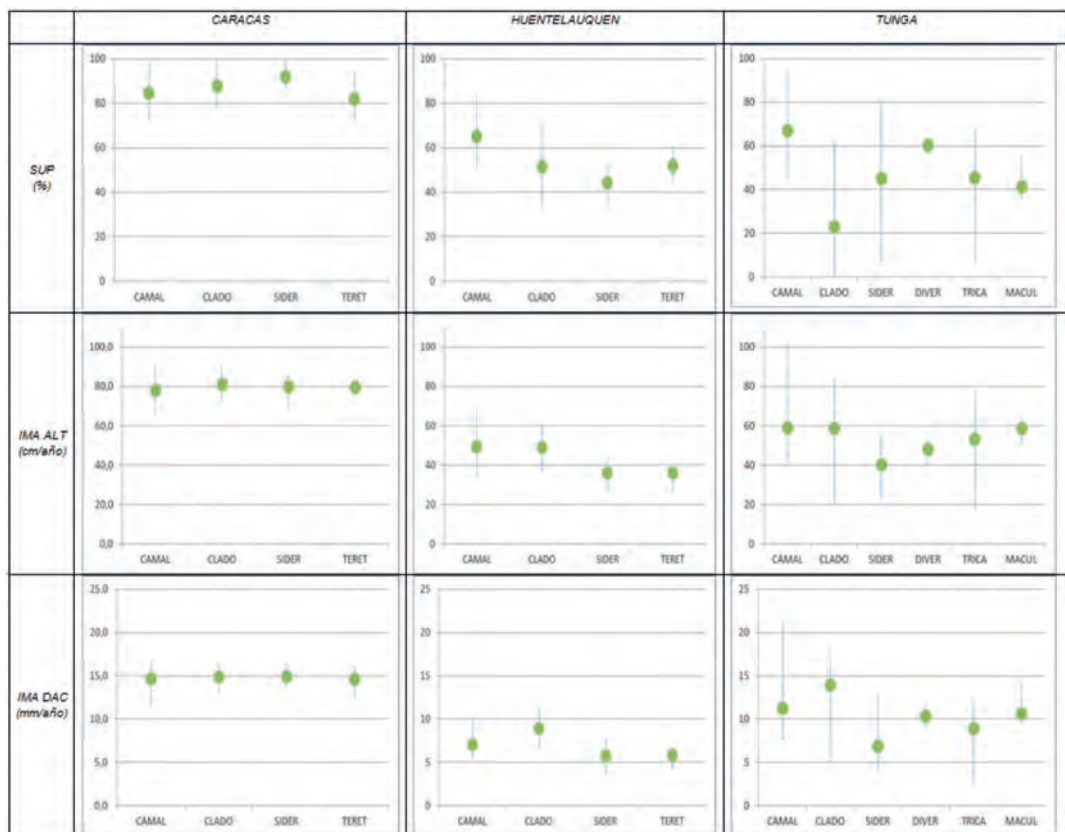
Resultados por Progenies

En la Figura N° 4 se presentan los resultados de supervivencia e incrementos medios anuales de altura y diámetro de cuello para las especies consideradas en cada uno de los tres ensayos evaluados, en ella se grafica también la variabilidad exhibida por las progenies de cada especie, señalándose los valores máximos y mínimos para cada variable a nivel de medias familiares.

En las condiciones del ensayo de Caracas, las cuatro especies evaluadas (*E. camaldulensis*, *E. cladocalyx*, *E. sideroxylon* y *E. tereticornis*) exhiben un comportamiento muy similar en términos de supervivencia y crecimiento inicial, así como una escasa variación en las respuestas exhibidas a nivel de progenies.

En Huentelauquén, donde se consideran las mismas especies del ensayo anterior, se observa una mayor diferenciación entre especies, así como una mayor variación entre las progenies evaluadas para cada una de ellas. En esta situación *E. camaldulensis* y *E. cladocalyx* manifiestan un mejor comportamiento en supervivencia y crecimiento que las especies restantes (*E. sideroxylon* y *E. tereticornis*).

En el ensayo de Tunga Norte, establecido en condiciones más adversas, la diferenciación entre especies, así como la variación entre progenies dentro de una misma especie, es más evidente que en los dos ensayos anteriores.



(CAMAL= *Eucalyptus camaldulensis*; CLADO= *E. cladocalyx*; SIDER= *E. sideroxylon*; TERET= *E. tereticornis*; DIVER= *E. diversicolor*; TRICA= *E. tricarpa*; MACUL= *Corymbia maculata*.)

Figura N° 4

VALORES MEDIOS DE SUPERVIVENCIA E INCREMENTO MEDIO ANUAL EN ALTURA Y DIÁMETRO DE CUELLO POR ESPECIE, CON DETALLE DE LOS VALORES EXTREMOS A NIVEL DE MEDIAS FAMILIARES PARA CADA VARIABLE Y ENSAYO EVALUADO

CONCLUSIONES

E. camaldulensis es una especie reconocida por su capacidad de prosperar y producir cosechas aceptables en suelos relativamente pobres y con estación seca prolongada. Estas características le han permitido establecerse con éxito en zonas mediterráneas de distintas partes del mundo y estar relativamente difundida en zonas áridas de Chile.

Los resultados derivados del análisis a nivel de especies en el ensayo Caracas permiten concluir que además de *E. camaldulensis* existen otras especies que presentan el mismo desempeño en sus estadios iniciales de desarrollo, cuando las condiciones de aridez no son tan severas.

Considerando que *E. cladocalyx*, *E. sideroxylon* y *E. tereticornis* muestran un desempeño equivalente al de *E. camaldulensis*, en zonas semiáridas con influencia costera, se puede afirmar que estas especies pueden ofrecer un potencial similar para establecer plantaciones en las zonas áridas del país que están influenciadas por esta condición.

Por el contrario, cuando las condiciones de aridez se acentúan, los resultados de los ensayos Tunga Norte y Huentelauquén indican que la mayoría de las especies evaluadas, con excepción de *E. cladocalyx* y *C. maculata*, pierden competitividad.

La evaluación de los tres ensayos anteriores permite concluir además que *E. cladocalyx* es una especie cuyo comportamiento en zonas áridas es similar y en algunos casos superior al de *E. camaldulensis*, constituyéndose en una de las especies más adecuadas para efectuar plantaciones en estas zonas.

Las especies *E. sideroxylon* y *E. tereticornis* tienden a presentar, en las condiciones analizadas, comportamientos menos interesantes que el de las especies restantes.

La variabilidad observada entre progenies de las especies analizadas ofrece la posibilidad de selección y mejoramiento genético para incrementar su productividad y desarrollar líneas de mejor adaptación y producción para condiciones locales de cultivo. Estos esfuerzos parecen especialmente justificados para las especies *E. camaldulensis*, *E. cladocalyx* y *C. maculata*.

REFERENCIAS

Alvear, C. y Gutiérrez, B., 1995. Crecimiento hasta los 42-44 meses de edad y estimación de parámetros genéticos de 23 procedencias y 196 familias de *Eucalyptus camaldulensis* Dehn en cuatro sitios de la zona central de Chile. Ciencia e Investigación Forestal 9(1): 23-46.

Gutiérrez, B. y Chung, P., 1993. Crecimiento inicial de 23 procedencias y 196 familias de *Eucalyptus camaldulensis* Denh en cuatro sitios de la zona central de Chile. Ciencia e Investigación Forestal 7(1): 5-22.

King, J. and Krugman, S., 1980. Test of 36 *Eucalyptus* species in Northern California. USDA Forst service. Research Paper PSW-152. 12 p.

Parra, P. y Chung, P., 1997. Comportamiento de procedencias de *Eucalyptus cladocalyx* F. Muell de 31 meses de edad. Los vilos, IV Región. En: Valdebenito, G y Benedetti, S. (editores). Forestación y Silvicultura en Zonas Áridas y Semiáridas de Chile. INFOR-CORFO. Santiago, Chile. Pp: 153-160.

Serradilla, J., 2000. El eucalipto en la sociedad y el medio forestal. Centro de Investigación y Documentación del Eucalipto (CIDEU). Huelva, España. 12 p.

Smith, N., 1997. Comportamiento de *Eucalyptus camaldulensis* en Longotoma, Chile. Base para el mejoramiento de la especie en la zona semiárida. En: Valdebenito, G. y Benedetti, S. (editores). Forestación y Silvicultura en Zonas Áridas y Semiáridas de Chile. INFOR-CORFO. Santiago, Chile. Pp: 186-196.





IV. SELECCIÓN Y MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS ORIENTADO A PRODUCTOS



17. DESARROLLO Y PERSPECTIVAS DEL MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS PARA PRODUCCIÓN DE PULPA

Nuno Borralho¹

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las plantaciones de eucaliptos en el mundo, alrededor de 14 millones de hectáreas, están destinadas prioritariamente a la producción de papel a partir de celulosa de fibra corta. Esta es una industria global, madura y ambientalmente sostenible, con una tecnología de producción bien establecida. A nivel mundial, el sector genera 110 mil millones de dólares, que corresponde a aproximadamente un 2,5% de la producción industrial total. Es, desde el punto de vista de generación de riqueza, un sector con tanta relevancia como la aeronáutica o el acero.

En este mercado, la pulpa de eucalipto corresponde aproximadamente al 20% del total producido y negociado, del cual aproximadamente el 70% tiene lugar en los países económicamente más desarrollados (Europa, América del Norte y Japón). En estos países, el crecimiento del consumo de papel virgen se ha frenado y puede entrar incluso, por primera vez en la historia, en un descenso sostenido. Sin embargo, en la última década se observó una creciente demanda de las economías emergentes, y en particular de India y China. Es debido en particular a ellas, que la demanda global del papel sigue creciendo a una tasa anual de 2%. Sin embargo, aunque los precios varíen a veces con gran amplitud, su tendencia a largo plazo es descendente, como con las demás pulpas de fibra corta (BHKP) y de resinosas de fibra larga (BSKP). Esto pasa porque en general la demanda ha sido más que compensada por el aumento de la producción forestal y de la capacidad industrial, en particular en nuevas plantaciones y plantas en América del Sur y Sudeste de Asia.

La paulatina disminución de la competitividad de los productores tradicionales de pulpa, como EEUU, Canadá, Norte de Europa y Japón, por mayores costos de producción, equipo industrial más antiguo, menor productividad forestal y mayores restricciones al acceso a los bosques nativos, ha sido compensada por nuevos productores con costos más bajos. En este contexto, para mantener su competitividad a nivel mundial, los productores tendrán la necesidad de seguir reduciendo sus costos de producción.

Mejorar la calidad del producto final y mitigar los impactos ambientales, seguirán siendo aspectos relevantes en la industria, pero secundarios en relación a sus costos de producción. En general, las plantas de celulosa más competitivas en el futuro serán las que produzcan una pulpa barata y de calidad estándar. Es en este sentido que el mejoramiento genético se puede constituir en una de las herramientas más poderosas a disposición de la industria.

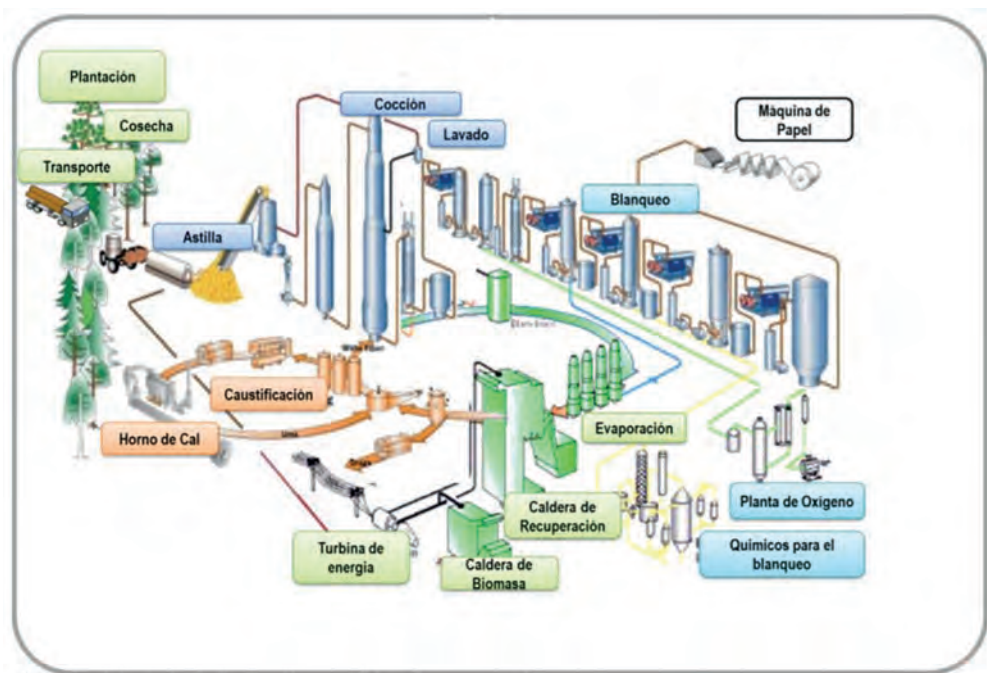
En este capítulo, se revisan las funciones de producción asociadas a distintas etapas de la cadena de producción de pulpa de celulosa, se analizan los beneficios potenciales

¹ Consultor en Genética y Mejoramiento Forestal, Investigador Asociado Centro de Estudos Florestais, Univ. Técn. Lisboa, Portugal. nunoborralho@sapo.pt

asociados a cambios en las distintas variables biológicas, y de qué modo se deberá estructurar las metodologías y procedimientos de selección de modo a maximizar los beneficios para el sector de pulpa en los programas de mejoramiento genético.

CADENA DE PRODUCCIÓN DE CELULOSA Y EL IMPACTO DE LAS DISTINTAS CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA

A través del mejoramiento genético es posible cambiar permanentemente aspectos relacionados con la productividad forestal y calidad de la madera. Sin embargo, hay muchas características que potencialmente podrían ser elegidas como interesantes. Es por eso fundamental en un primero momento, saber cuáles tendrán un mayor impacto económico en la cadena de producción, de modo de concentrar en ellas el esfuerzo de mejoramiento genético. Por eso, la determinación de la importancia económica de las variables biológicas disponibles para el investigador es el primer paso de la estrategia de mejoramiento. Se considera, en primer lugar y con algún detalle, cuál es estructura de la producción y transformación de madera hasta la pulpa (Figura N° 1).



(Fuente: Adaptado de ilustración en wikimedia commons).

Figura N° 1
CADENA DE PRODUCCIÓN DE PULPA DE CELULOSA
DESDE LA PLANTACIÓN HASTA LA FABRICACIÓN DE PAPEL

Producción Forestal

El primer componente de la cadena es la *producción forestal*. En el caso del sector de celulosa de eucalipto, las plantaciones son en su mayor parte manejadas con el único propósito de producir madera para papel.

Esta situación contrasta con la cadena de producción de pulpa de fibra larga (BSKP), en la que la madera destinada a astilla es a menudo un subproducto, de raleos o desechos del aserradero, y donde la producción forestal principal es la madera sólida.

Una plantación destinada solamente a un producto simplifica la definición del modelo de producción (Ej. silvicultura y plan de manejo) y, en consecuencia, la definición de cuál deberá ser el objetivo del programa de mejoramiento.

Aunque la productividad forestal se expresa generalmente en metros cúbicos por hectárea, en una cadena integrada de producción de celulosa, esta productividad debe pasar a expresarse en toneladas de pulpa por hectárea:

$$Prod\ Pasta\ (t/ha) = VOL \times DEN \times REN$$

Esta productividad de pulpa es función del volumen por hectárea VOL (m³), de la densidad de la madera, completamente seca DEN (t/m³) y del rendimiento pulpable REN (%). Los costos asociados a esta producción (\$/t de pulpa) vienen de:

$$C_{Prod} \propto \frac{1}{VOL \cdot DEN \cdot REN}$$

Donde el símbolo $\propto$ significa “proporcional a”. La productividad forestal VOL es un parámetro complejo. Depende en primer lugar del potencial de crecimiento de los árboles en condiciones consideradas óptimas. Sin embargo, en cualquier situación real habrá factores que van a limitar esa productividad potencial, ya sea por el efecto de agentes bióticos (plagas y enfermedades) o abióticos (sequía, frío, mala nutrición). En otras palabras, y de modo simplificado:

$$VOL = VOL_0 \times F_{Biot} \times F_{Abiot}$$

En que los factores restrictivos F pueden variar desde 0 hasta 1. Ellos representan la susceptibilidad o el riesgo de daño que una plantación presenta, sea relacionada con mortalidad o con pérdidas de crecimiento. Este tema será profundizado más adelante.

$$C_{Cosecha} \propto \frac{1}{f(VOL, FORM) \cdot DEN \cdot REN}$$

A su vez, los costos asociados al volteo y cosecha se expresan generalmente en horas de máquina por metro cúbico de madera (h/m³). Estos costos son en general funciones no lineales del diámetro de los árboles y así indirectamente del volumen, puesto que el espaciamiento no varía mayormente, y de la forma o rectitud. Sin embargo, otros aspectos como la topografía del terreno y la experiencia del operador también tienen su importancia (Ej. Burla, 2008). Para expresar el rendimiento de la cosecha en costos por toneladas de celulosa:

La función $f(VOL, FORM)$ en el denominador es generalmente logarítmica, es decir del tipo VOL^k (Ej. Barrios *et al.*, 2008) y $FORM^k$ (Ej. Greaves *et al.*, 1997a).

Los costos de transporte son determinados en general por el peso de la madera transportada y no por su volumen o rectitud. Cuando se expresan en toneladas de pulpa, vienen de:

$$C_{Transp} \propto \frac{1}{DEN \cdot REN}$$

Agregando los tres componentes forestales, los costos de madera vienen de:

$$C_{madera} = \frac{C_{Plantacion}}{VOL.DEN.REN} + \frac{C_{Cosecha}}{VOL^{k_1}.DEN.REN.FORM^{k_2}} + \frac{C_{Transporte}}{DEN.REN}$$

Dependiendo de las condiciones de cada país o región, los costos finales de la madera de eucalipto pueden variar de 40 a 150 US\$/t, lo que representará un 25 a 40% de los costos finales de producción de pulpa. De estos, aproximadamente 2/3 son debidos a cosecha y transporte hasta la fabrica.

Proceso Industrial

Una vez llegada a la cancha de acopio de la fábrica, la madera sufrirá cambios físicos y químicos hasta que se produzca la pulpa de celulosa (Figura N° 1 y en particular el diagrama Figura N° 2).

El primer paso es el chipiado, que transforma las trozas en astillas. Se sigue la cocción química que reducirá la madera a sus componentes (fibra y lignina). Esto se puede hacer mediante la cocción de las astillas en distintos tipos de soluciones químicas, tales como sulfatos o sulfitos o soda cáustica. En las más modernas unidades industriales, como las de Chile, se utiliza el proceso alcalino/sulfato (o *kraft*). En este proceso, las astillas de madera se cocinan, en *el digestor*, dentro de una solución de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio (licor blanco) que causa la disolución de las moléculas de lignina en el licor álcali.

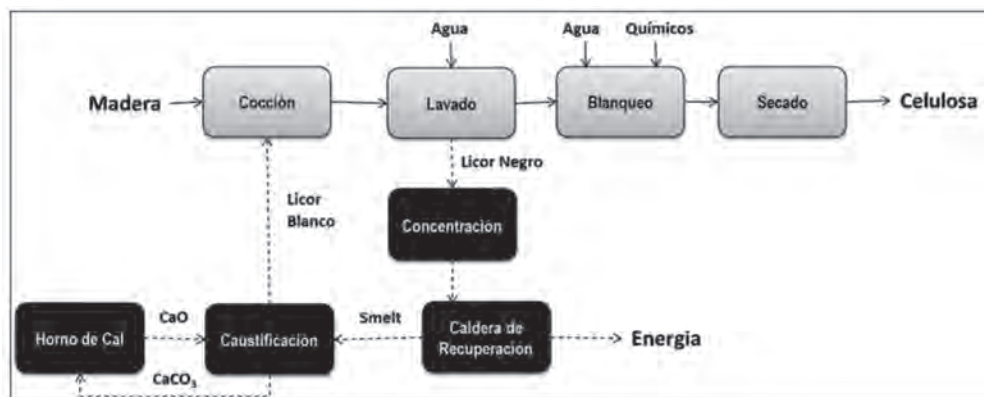


Figura N° 2
LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE UNA FÁBRICA DE CELULOSA

Para optimizar la producción, los digestores más modernos trabajan a temperaturas más bajas, lo que reduce las necesidades de vapor, y son de cocción continua disponiendo de un control detallado del perfil de alcalinidad durante el proceso de cocción. Para eso tienen varios puntos de entrada de licor blanco y de salida del licor negro, lo que permite obtener una extracción más eficiente de la lignina, mientras mantiene o incluso mejora el rendimiento y la resistencia de la celulosa.

Estas nuevas tecnologías de digestores incluyen por ejemplo los MCC (*Modified Continuous Cooking*), desarrollados por Kamy, los ITC (*Iso Thermal Cooking*) y los de cocción compacta desarrollados por Kvaerner, o el sistema *LoSolids* desarrollado por Ahlstrom. La

Figura N° 3 ilustra la secuencia de etapas de cocimiento en continuo para uno de estos sistemas.

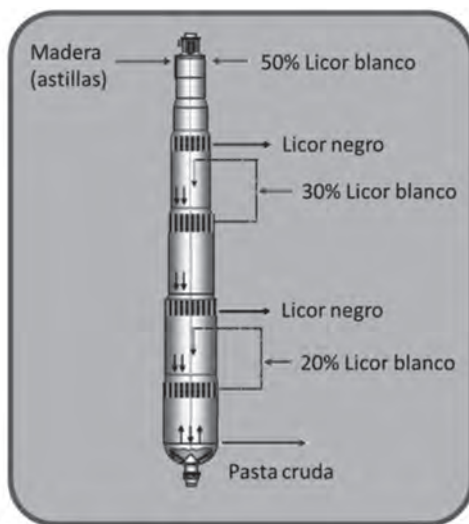


Figura N° 3
ESQUEMA TÍPICO DE LA SECUENCIA DE COCCIÓN
EN UN DIGESTOR DE TIPO CONTINUO MODIFICADO

Después de la etapa de cocción en los digestores, la pulpa seguirá por un proceso de lavado y, si es necesario, un blanqueo final para eliminar la presencia de la lignina residual, responsable de la coloración en la pulpa cruda. Esto debe hacerse sin que se produzca pérdida de la calidad de la pasta (relacionada con la integridad de las cadenas de celulosa en la pulpa), pérdidas de rendimiento, o impactos ambientales negativos, particularmente por la posibilidad de generación de compuestos organoclorados. Con el blanqueo termina la fabricación de pulpa.

Sin embargo, las actividades en una planta de celulosa no terminan aquí. Hay que considerar algunos pasos esenciales de reciclado químico necesarios a la cocción. Así, el licor y la lignina disuelta, producidos en el digestor durante la cocción (llamado "licor negro"), se quemarán en la caldera de recuperación, para recuperar los químicos álcali y poder reutilizarlos en nuevas cocciones. El primer paso en esta recuperación es la evaporación del licor. Esto es necesario para concentrar la solución (hasta un 80%) y permitir su combustión, al mismo tiempo que se eliminan algunos contaminantes. En las fábricas más modernas, estos evaporadores funcionan como verdaderos molinos de agua dentro de la fábrica. Cuando se alcanza la concentración deseada, el licor negro se quema en la cámara de combustión, produciendo en el proceso, electricidad, vapor y en especial los productos químicos recuperados. Estos tendrán que disolverse (formando el llamado "licor verde"), y entrar en una nueva etapa del proceso, llamada de caustificación. Ahí se mezcla el licor verde procedente de la caldera de recuperación con la cal (CaO), formando de nuevo el licor blanco, necesario para la cocción en el digestor. Este paso funciona también como un ciclo cerrado, en el que el horno de cal convierte el lodo (con CaCO_3) salido del proceso de caustificación, en cal con un alto contenido de CaO (Figura N° 2).

DESARROLLO DE LAS FUNCIONES DE PRODUCCIÓN Y DE PESO ECONÓMICO

Definidos las distintas etapas del proceso de producción, el próximo paso es la determinación del peso o ponderación económica para las variables biológicas en el árbol. Para eso hay que desarrollar relaciones plausibles entre cada una de ellas y los costos o beneficios en las distintas etapas de la cadena de producción de celulosa. Esto puede establecerse con los resultados empíricos obtenidos en una planta en particular, como lo han propuesto Korpunen *et al.* (2012), Fonseca *et al.* (1995) o López *et al.* (2009), quienes han desarrollado funciones matemáticas para cada una de las etapas del sistema de producción, o como las propuestas por Borralho *et al.* (1993) y más tarde detallado para las diferentes etapas de transformación industrial por Greaves y Borralho (1996) y que se detallan a continuación. En ellas, los costos industriales asociados a la producción de pulpa de celulosa están expresadas en \$/t de pasta cruda seca, y pueden ser agrupados en:

$$C_{Pasta} = C_{Chip} + C_{Diges} + C_{Quim} + C_{Evap} + C_{Recup} + C_{Caust}$$

Los costos del chipiado o de formación de astilla (C_{chip}) son proporcionales a:

$$C_{Chip} \propto \frac{1}{REN}$$

Los costos asociados a la cocción (C_{diges}), en particular los relacionados con el consumo de álcali efectivo (AE) vienen de:

$$C_{Diges} \propto \frac{1}{DEN \cdot REN}$$

Hay además que incluir otros productos químicos utilizados en la cocción (más allá del AE ya contabilizado), dados por la relación:

$$C_{Quim} \propto \frac{1}{REN}$$

Por último, los costos asociados a la recuperación de productos químicos (evaporadores, recuperador y caustificación), son:

$$C_{Evap} \propto \left(\frac{1}{DEN} + k_1(1 - REN) + k_2 \right) \cdot \frac{1}{REN}$$

$$C_{Rec} \propto \frac{1 - REN}{REN}$$

$$C_{Caust} \propto \frac{1 - REN}{REN}$$

Los coeficientes $k_1 = 1,6$ y $k_2 = 0,7$ propuestos por Greaves y Borralho (1996) dependen de las características de la fábrica y de las propiedades de la madera, independientemente de DEN y REN. También cabe señalar que los costos netos asociados con la caldera de recuperación son menores que cero, es decir corresponden a un beneficio, ya que la energía que se produce en este paso se puede vender o ser utilizada en otras etapas del proceso (Greaves y Borralho, 1996).

Las funciones matemáticas propuestas por Greaves y Borralho (1996) y Greaves et al. (1997a), son tales que minimizan los costos de producción (es decir, $\min \sum C_i$), y se aplican a una planta hipotética, teóricamente sin *cuellos de botella*. Sin embargo, una alternativa válida podría ser la maximización de los beneficios en una planta ya existente, teniendo en consideración *cuellos de botella* específicos, y en que el propósito sería ahora $\max(V - \sum C_i)$. En este caso, la función dependería no sólo de la reducción de costos de producción, sino de aumentos en las ventas de pulpa (V), siendo estas en general proporcionales a:

$$V \propto \frac{REN}{1 - REN}$$

La Importancia Económica de VOL, DEN y REN

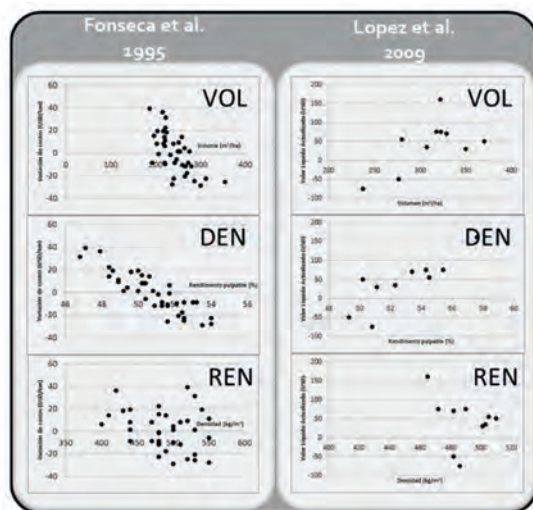
La determinación de los pesos o ponderadores económicos se puede obtener a partir de las funciones de producción descritas, calculando las derivadas parciales de las funciones, para cada una de las variables biológicas, como se propone en Borralho et al. (1993), o estimando la variación en los costos asociados a pequeños cambios en cada variable, por ejemplo el asociado a un cambio de $0,1 \sigma^a$, como se propone en Greaves et al. (1997a).

Alternativamente, la derivación del peso económico puede hacerse midiendo directamente el impacto económico que se esperaría obtener en una planta en particular, cuando se usan materiales de valores contrastantes de VOL, DEN y REN. En la Figura N° 4 se presenta una ilustración de esta estrategia más empírica. Se puede observar cual es la variación en los costos (Fonseca et al., 1995), o el retorno de la inversión (de López et al., 2009), en que cada punto corresponde a un distinto clon de eucalipto, con sus características propias de productividad y calidad de madera. Es evidente que hay relaciones significativas entre las tres variables (VOL, DEN y REN) y los costos de producción o rentabilidad de la inversión. En este caso, el respectivo peso económico corresponderá a la pendiente de la regresión lineal.

En la Figura N° 5 se resume los distintos pesos económicos, expresados en términos relativos al volumen (i.e., considerando VOL = 1) según diversos autores y metodologías. Se puede concluir que la importancia relativa de cada variable cambia según la perspectiva adoptada.

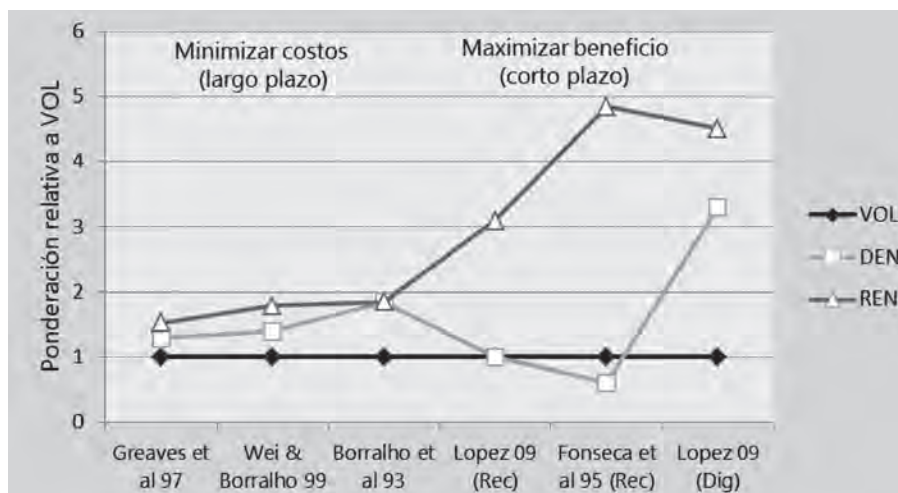
Si el objetivo es reducir los costos a largo plazo, REN y DEN tendrían pesos similares entre sí y ambos un poco más que el VOL. Un aumento del 10% en rendimiento pulpable (por ejemplo, de 50 a 55%), o de DEN (de 500 a 550 kg/m³) conducirá a reducciones de costos entre 0,5 y 2 veces más que si el VOL aumentara un 10%.

A su vez, si la perspectiva es la maximización de beneficios o rentabilidad de la inversión (a corto plazo y para una planta en particular), la importancia de REN aumenta significativamente en relación a VOL y DEN, a menos que la producción de la fábrica sea limitada por el digestor, en que DEN pasó a tener importancia comparable a REN. Maximizar solamente la producción de pulpa por hectárea, un objetivo común en muchos programas de mejoramiento genético, correspondería a tener VOL, DEN y REN con un mismo peso relativo (i.e. VOL=REN=DEN), que es claramente distinto de los pesos reportados en la Figura N° 5, y que agregan las etapas de fabricación de pulpa.



(Fuente: Adaptado de Fonseca *et al.*, 1995 y López *et al.*, 2009).

Figura N° 4
VARIACIÓN DE COSTOS POR TONELADA DE PULPA (izq) Y VALOR ACTUALIZADO NETO DE UNA INVERSIÓN EN UNA PLANTA DE CELULOSA (der), Y SU RELACIÓN CON LOS CAMBIOS DE VALORES DE VOL, DEN Y REN PARA DISTINTOS MATERIALES (CLONES) DE EUCALIPTO



Las ponderaciones se agrupan en los casos en que el objetivo fue minimizar los costos de producción de celulosa a largo plazo, y el retorno de inversión a corto plazo. En este caso, se presentan fábricas donde la limitación a la producción está en el recuperador (REC) y en el digestor (DIG).

Figura N° 5
PESOS RELATIVOS PARA DENSIDAD (DEN) Y RENDIMIENTO PULPABLE (REN), RESPECTO AL VOLUMEN POR HECTÁREA (VOL = 1), SEGÚN VARIOS AUTORES.

Hasta ahora los pesos o ponderaciones han sido presentados en términos relativos. En valor absoluto, las ponderaciones asignadas a cada variable corresponderán a la variación real en el costo o en el beneficio, por cada tonelada de pulpa producida (\$/t), que estará asociada a una variación unitaria de la variable, o sea de 1 m³/ha para VOL, 1 kg/m³ para DEN o de un punto porcentual para REN (Cuadro N° 1). Los valores absolutos, por tanto,

dependerán de la estructura de costos que cada autor haya adoptado y son por eso difíciles de comparar.

Sin embargo se puede concluir del Cuadro N° 1 que los pesos registrados han sido relativamente consistentes entre autores. De un aumento en la productividad de 1 m³/ha se esperarán reducción de costos de 0,16 y 0,38 US\$/t, de un aumento en densidad de 1 kg/m³, de 0,10 a 0,35 US\$/t y de un aumento de rendimiento de un punto porcentual, una reducción de 2,5 a 12,3 US\$/t.

Cuadro N° 1
PONDERACIÓN ECONÓMICA EN VALOR ABSOLUTO (US\$/t POR UNIDAD DE MEDICIÓN) PARA VOLUMEN (VOL), DENSIDAD (DEN) Y RENDIMIENTO PULPABLE (REN) SEGÚN DIVERSOS AUTORES

Fuente	VOL (m ³ /ha)	DEN (kg/m ³)	REN (%)
Greaves <i>et al.</i> , 1997a	0,269	0,349	4,11
Borralho <i>et al.</i> , 1993	0,270	0,250	2,50
Fonseca <i>et al.</i> , 1995	0,333	0,104	8,65
Wei y Borralho, 1999	0,380	0,269	3,39
Bassa <i>et al.</i> , 2005	0,161	0,126	12,3

Impacto de Errores en los Pesos de las Variables

Aunque es evidente que VOL, DEN y REN son todas variables importantes, se observa que sus pesos relativos y absolutos pueden variar dependiendo de las hipótesis y metodología. ¿Cuál es el impacto del uso de pesos errados o sesgados? Varios autores han intentado responder a esta pregunta (Ej. Borralho *et al.*, 1993 o Wei y Borralho, 1999). Los resultados mostraron que aun cuando los pesos relativos asignados a VOL, DEN y REN se cambien mucho, la eficiencia de selección se mantiene alta. Las correlaciones genéticas entre índices basados en distintos pesos (y distintas estructuras de costos) variaron de 0,98 y 1,00.

En otras palabras, las selecciones fueron casi las mismas cuando la estructura de costos fue diferente. Las correlaciones caen significativamente cuando se empezó a comparar objetivos diferentes, como es entre la pulpa por hectárea (que depende más que todo de la productividad) y la minimización de costos de pulpa (que incorpora también los costos de fabricación de celulosa). Sin embargo, incluso en estos casos las correlaciones fueron de 0,6 a 0,8. Por lo tanto, se puede concluir que los errores en la estimación del peso económico para VOL, DEN y REN no darán lugar a impactos significativos en la eficiencia de la selección.

Futuros Desarrollos en las Funciones de Producción

Las funciones anteriormente propuestas se refieren a la producción de pulpa cruda. No incluyen los costos asociados al blanqueo o a aspectos de la fabricación de papel. En cuanto al blanqueo, merece alguna referencia el tema de la presencia y naturaleza de un tipo particular de hemicelulosas (llamadas xilanos), que están involucradas en algunas reacciones químicas desfavorables durante la cocción.

En eucaliptos, las hemicelulosas contribuyen con 13 a 18% del peso seco en la madera, y cerca de la mitad de las cuales son xilanos. A pesar que una alta proporción será

degradada o disuelta en el licor negro, el 50 a 70% de la proporción original se quedará en la pulpa y contribuirá en forma importante al valor final de REN. Sin embargo, en eucaliptos, este alto contenido de xilano se asocia también a altos niveles de ácidos urónicos (HexA), que a su vez reaccionan con productos químicos usados en el blanqueo, como son el ClO_2 y el ozono (Magaton *et al.*, 2011). El resultado es que eleva los costos de blanqueo y afecta el desempeño ambiental de la fábrica. La presencia de HexA está además asociada a problemas de estabilidad de la blancura, y a reacciones con el permanganato durante la cocción, afectando el valor kappa en esta etapa.

En resumen, si por un lado un alto contenido de xilano es deseable por su efecto positivo en el rendimiento en pulpa cruda, por el otro, tiene un efecto negativo en la eficiencia y calidad del blanqueo. La incorporación de la etapa de blanqueo en la función objetivo, por lo tanto, deberá valorar maderas con bajos niveles de HexA y consecuentemente bajos contenidos de xilano.

Como en general se ha encontrado una relación positiva entre REN y contenido de hemicelulosas, se podría considerar, de forma muy simplificada, que los costos de blanqueo van a ser inversamente proporcionales al tenor de hemicelulosas (y en particular a xilanos), y a su vez a:

$$C_{\text{Blanqueo}} \propto \frac{1}{XIL} \approx \frac{1}{REN}$$

La etapa de blanqueo corresponde a un 10 a 20% de los costos totales de fabricación de pulpa (Korpunen *et al.*, 2012), significativamente menos que la cocción o recuperación química. Por lo tanto, aunque considerando que el blanqueo conduzca a una disminución de la importancia relativa de las hemicelulosas y por consecuencia de REN, el impacto final en los pesos deberá ser pequeño y las conclusiones obtenidas hasta la producción de pasta cruda (Cuadro N° 1) se mantendrán válidas.

Sobre la producción de energía, cabe señalar que el valor asociado a su cogeneración en plantas de celulosa, ya sea por el impacto positivo sobre las emisiones evitadas de carbono o la posible venta de electricidad a la red, se está considerando como uno de los aspectos de mayor importancia en la economía de las nuevas plantas, en particular en países en que el precio de la *energía verde* está subvencionado en forma significativa. Aunque el valor asociado a la cogeneración de energía por la quema de licor negro ya fue incluido en la formulación de Greaves y Borralho (1996), se podrían añadir a la función general los beneficios asociados a la quema de residuos de biomasa y en particular de la corteza. Según los casos, este componente puede ser responsable de una parte significativa (10 a 20%) de la energía cogenerada en una planta de celulosa. En este caso, podría añadirse como variable de interés el peso seco de corteza por hectárea, algo que en eucalipto ha demostrado tener variabilidad (Quilhó y Pereira, 2001) y una heredabilidad interesante (Otegbeye y Kellison, 1980; Hardner y Tibbits, 1998 y Wei y Borralho, 1997).

Por último, la posibilidad de inclusión de un término que refleje el valor de la calidad de la pulpa desde el punto de vista de la fabricación de papel es algo que merece algún comentario. Raymond y Greaves (1997) propusieron añadir a la función de producción un nuevo término, al que llamaron costo de calidad (Figura N° 6). Este corresponde al costo extra (\$/t pulpa) necesario para que el producto tuviese un valor preferencial para el cliente.

Desafortunadamente, el costo o beneficio asociado a la calidad de celulosa kraft es difícil de cuantificar ya que dependerá de las preferencias del cliente y del mercado. También es difícil de caracterizar qué variables biológicas van a ser más relevantes. Raymond y Greaves (1997), citando a otros trabajos, presentan DEN, REN y longitud de las fibras como las variables más influyentes en la calidad del papel, pero algunas de estas relaciones son complejas y a veces contradictorias.

En la Figura N° 7 se intenta ilustrarlas. Las características de la madera con mayor impacto en el papel aparentemente son la longitud de las fibras, la cantidad de fibras por unidad de peso y la densidad de madera. Fibras más largas y un mayor número de fibras por unidad de peso originan una mejor formación y porosidad en el papel y mejores características ópticas. El aumento de la densidad de la madera, o más específicamente una reducción de la proporción entre la anchura y el espesor de la pared de las fibras, conduce a una mayor rigidez y volumen de la hoja de papel, mejor drenaje y características de secado de la pulpa. Por último, un mayor contenido de hemicelulosas tiene impactos positivos sobre la resistencia del papel, entre otros aspectos, a pesar de las limitaciones que trae al blanqueo.

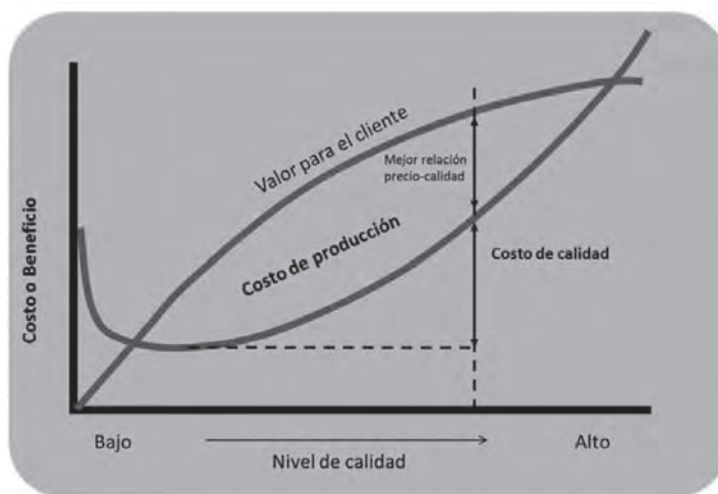
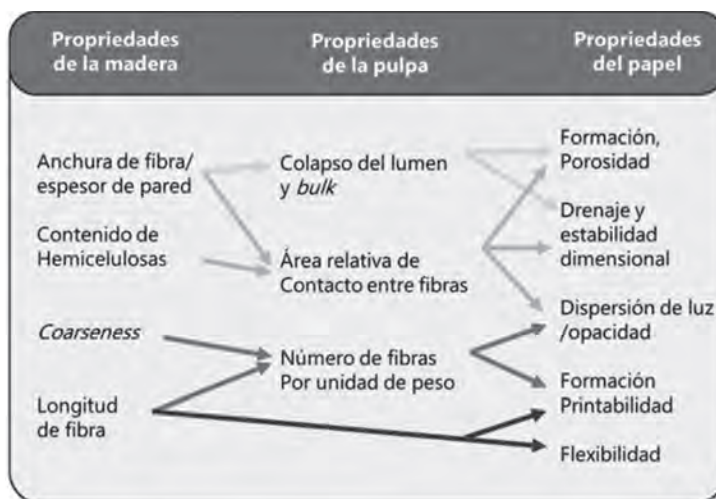


Figura N° 6

RELACIÓN HIPOTÉTICA ENTRE COSTOS DE PRODUCCIÓN Y EL VALOR PARA EL CLIENTE (PRODUCTOR DE PAPEL), A MEDIDA QUE SE CAMBIA LA CALIDAD FINAL DE LA PULPA PRODUCIDA. EL COSTO DE CALIDAD SERÍA DEFINIDO COMO EL AUMENTO EN LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN QUE CORRESPONDEN A LA “MEJOR RELACIÓN CALIDAD-PRECIO” PARA EL CLIENTE

En general algunas de estas características van a afectar al rendimiento de las máquinas de papel (reducción de sus costos de producción), otras afectarán características cualitativas del papel, sin embargo estas y su relevancia van a depender del tipo de papel en cuestión y de las limitaciones en el proceso de cada planta papelera, lo que varía de caso en caso (Cotterill y MacRae, 1997). El impacto en la calidad y costo de fabricación del papel puede ser pertinente en el caso de una cadena de producción integrada, desde el bosque hasta el papel. Si la cadena de producción termina en la pulpa, los eventuales beneficios en la calidad de la fibra no se traducen en una diferenciación significativa de precios de pulpa. En otras palabras, el mercado no valorizará las diferencias y orígenes de la pulpa. Esto pasa hoy en día al comparar las pulpas de eucaliptos con otras especies de fibra corta (Ej. abedul o acacias). Por eso es cuestionable considerar la incorporación de variables de calidad de madera en el objetivo de mejoramiento, si su impacto ocurre solamente en aspectos específicos de la fabricación de papel.



(Fuente: Adaptado de Paavilainen, 2000).

Figura N° 7
EFFECTO DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA DE EUCALIPTO EN LAS PROPIEDADES DE LA PULPA Y CALIDAD DEL PAPEL

EL POTENCIAL DE GANANCIA CON EL MEJORAMIENTO GENÉTICO PARA VOL, DEN Y REN

Como se mencionó, el cálculo del peso económico de cada una de las variables es el primer paso en la decisión de una estrategia de selección en el programa de mejoramiento genético. Esto permite al mejorador decidir cómo enfocar el esfuerzo de medición y selección. Sin embargo, las ganancias genéticas efectivamente realizadas van a depender de otros factores, tales como la variabilidad genética de cada variable, su grado de control genético y la facilidad con que se puedan medir un gran número de candidatos. Se revisarán ahora estos aspectos y, para cada una, cuáles serán las ganancias esperadas. Para esto se emplea la conocida *ecuación del mejorador*:

$$\Delta = i \cdot \rho \cdot CV_g$$

La ganancia esperada (Δ), para el caso de una sola variable, dependerá de la intensidad de selección (i), de la precisión con que se realiza la selección (ρ) y del coeficiente de variación genética:

$$CV_g = \sigma_p \cdot h / u$$

Donde σ_p es la desviación estándar fenotípica de la medición, u es el promedio de la población y h es la raíz cuadrada de la heredabilidad).

Con el uso de CV en la ecuación, la ganancia pasa a expresarse en porcentaje, en relación a una población de referencia. La precisión de selección (ρ) se puede definir como una correlación, entre el criterio de selección, es decir el fenotipo, valor del índice o el BLUP, y su verdadero valor genético. Esta precisión varía de 0 a 1, dependiendo de la heredabilidad de la variable, de su correlación genética con el objetivo de mejora y, para cada árbol candidato a seleccionar, de la cantidad de información disponible, ya sea el número

de mediciones realizadas en sí mismo o en sus parientes más cercanos (hermano, hijos o padres). En el eucalipto, se dispone ya de buenas aproximaciones a los valores de referencia para ρ y CV_g de VOL, DEN y REN. Basado en eso, se revisarán ahora los mejores criterios de selección y las ganancias potenciales que se puede esperar.

Beneficios Potenciales en Volumen

- Volumen

El volumen es la variable que más se utiliza en programas de mejoramiento. Generalmente consiste en la medición de la altura, del DAP o de ambos. El DAP y la altura son excelentes indicadores del volumen del árbol, a partir por ejemplo de funciones del tipo $V = a * Dap^b * Ht^c$. Además ambos se correlacionan fuertemente entre sí, siendo casi equivalente selecciones basadas en DAP, altura o volumen. Las heredabilidades de volumen son en general bajas (entre 0,10 y 0,30), especialmente en árboles con menos de un año de edad, por lo que la precisión de selección (ρ) puede ser relativamente baja (entre 0,3 y 0,5).

En programas de mejoramiento más avanzados, basados en una selección del tipo BLUP o por índices, con material de pedigrí conocido e información disponible de parientes (en general hermanos o hijos), la precisión puede aumentar significativamente, hasta valores superiores a 0,6.

Por otro lado, el CV_g de VOL es alto, alrededor de 15 a 20% (Ej. Cornelius, 1994). En una selección masal, en que las intensidades son bajas (de 1:10 o sea $i=1,7$), las ganancias potenciales serán solamente de 8 a 13%. Al revés, en programas avanzados, con precisiones e intensidades de selección mucho más altas, los avances por generación deberán superar el 25%, como lo han establecido Volker *et al.* (1989), Borralho *et al.* (1992a) o Araújo *et al.* (1996). Para una planta de celulosa, estas ganancias en productividad representan una reducción de costos de 10 a 30 US\$/t.

- Mortalidad y Otros Factores Restrictivos para la Productividad

La variable VOL representa el volumen por unidad de superficie. Esto depende no sólo del crecimiento de los árboles, sino también del número de árboles vivos al final de la rotación. Sin embargo las dos variables no son totalmente independientes. Si la mortalidad o daño es de tipo disperso, el resultado será una mayor distancia entre árboles. Según ensayos de espaciamientos, se sabe que la consecuencia de esto, si ocurre en una etapa temprana del ciclo, es que los sobrevivientes o resistentes serán árboles mayores al final del ciclo. Así, la pérdida de algunos árboles será compensada con un mayor crecimiento de los sobrevivientes sin que el volumen por hectárea sea muy afectado.

En las plantaciones donde la supervivencia es alta, el volumen del árbol será un buen criterio para maximizar el volumen por hectárea. A medida que aumenta la mortalidad, este efecto de compensación ya no será suficiente para evitar una disminución significativa de VOL. Este problema fue analizado por Chambers y Borralho (1997), que concluyeron que para mortalidades por encima de 15% (si ocurre de forma dispersa) o de 5% (si es en manchas), la supervivencia pasaría a ser un criterio de selección más importante que el volumen individual de los árboles vivos, para efectos de maximizar el volumen por hectárea. En casos extremos de plantaciones donde se puede esperar pérdidas superiores a 40%, el peso relativo de la supervivencia pasaría a ser 6 veces más importantes que el volumen individual. En este caso,

relevante para programas destinados a condiciones ecológicas marginales, la estrategia de selección para VOL debería centrarse casi exclusivamente en una mayor supervivencia.

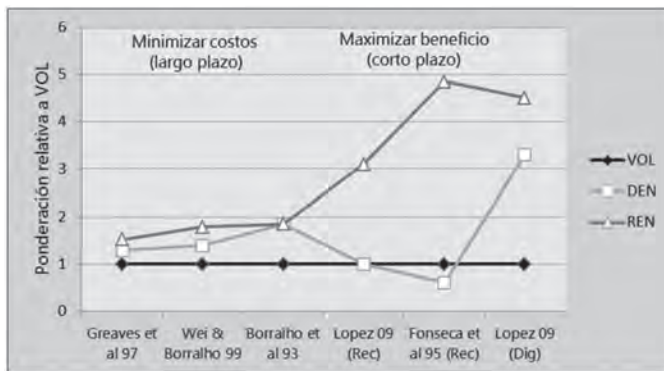
Desafortunadamente, la selección para la supervivencia es más compleja que para el crecimiento. Es una variable binomial (los fenotipos posibles son 0 o 1; muerto o vivo) y las causas biológicas son muchas veces múltiples y difíciles de determinar. La variación disponible depende de la tasa de mortalidad, siendo máxima cuando la incidencia es de 50%, y muy pequeña cuando las tasas son cercanas de 0 ó 100%, como es en general el caso. No sorprende que los estudios genéticos de supervivencia han encontrado en general una baja heredabilidad (entre 0,10 y 0,30; Volker *et al.*, 1995; Chambers *et al.*, 1996; Sanhueza *et al.*, 2002; Cappa *et al.*, 2010).

Otro de los problemas asociados a la supervivencia es la baja intensidad de selección posible, ya que su valor depende bastante de la incidencia. Si el 80% de los árboles están vivos, significa que casi todos los candidatos para la selección tendrán el mismo fenotipo (vivo), siendo por eso indistintos. Un análisis BLUP puede incorporar el promedio de supervivencia de la familia a la que cada árbol pertenece y esto mejorará la discriminación entre árboles de genealogías diferentes, pero no permitirá discriminar entre árboles vivos de una misma familia. El único caso donde se puede obtener una buena medida de supervivencia fenotípica es mediante clonación. En este caso, el valor de supervivencia de cada genotipo (clon) se puede calcular por el porcentaje de los *rametos* vivos. Cabe señalar que en general la supervivencia no parece estar genéticamente correlacionado con el crecimiento (Chambers *et al.*, 1996).

Un aspecto importante a considerar con la eventual inclusión de la mortalidad en el programa de selección, o de otros factores de daño con impacto significativo en el VOL, como plagas y enfermedades o la ocurrencia de heladas, es que ellos pueden tener un efecto local y esporádico. Un posible precio a pagar por añadirlas en un programa de selección es que, si la situación de daño después no ocurre, como son variables no correlacionadas con el crecimiento, resultará una pérdida en la eficiencia de selección para VOL. Una estrategia es considerar los daños como un “riesgo” con una determinada probabilidad que ocurra, y que hay que limitar. El objetivo de mejoramiento genético cambiaría de solamente *minimizar costos* o *maximizar beneficios* para incluir ahora una restricción de que el riesgo se quede bajo un cierto valor crítico.

Woolaston y Jarvis (1995) y Chambers y Borralho (1997) examinaron el tema de la mortalidad, recomendando el uso de los llamados índices de selección para *ganancias deseables*, algo inicialmente propuesto por Pesek y Baker (1969), pero poco utilizado en programas de mejoramiento. Aunque la eficacia de esta estrategia dependerá de la correlación genética entre el crecimiento y la causa del daño, la pérdida de eficiencia de la selección para VOL libre del daño es en general pequeña, esto es válido siempre y cuando la presión de selección para reducir el daño sea también pequeña.

Chambers y Borralho (1997) observan que desde el momento que se fija una ganancia *deseable* para la variable del riesgo (en el caso, supervivencia), inferior al 5 ó 10%, en situaciones en que no ocurra mortalidad el impacto negativo es mínimo en las ganancias en VOL (Figura N° 8). Estos resultados sugieren que para la mayoría de las situaciones, el volumen individual (libre de daños) deberá continuar siendo el criterio principal de selección para incrementar el volumen por hectárea, esto debe mantenerse también en el caso que el daño ocurra con alguna frecuencia. Los programas sólo deberían imponer una presión de selección en variables relacionadas con riesgos de daños si se espera que sus plantaciones sufran reducciones de productividad agregadas, mayores del 10-15%.



(Fuente: Adaptado de Chambers y Borralho, 1997).

Se presentan los casos en los que la supervivencia tiene una correlación genética con volumen por árbol de -0,5; 0 y 0,5

Figura N° 8

IMPACTO EN LAS GANANCIAS EN VOLUMEN POR HECTÁREA CUANDO SE INCLUYE TAMBIÉN LA SUPERVIVENCIA COMO CRITERIO DE SELECCIÓN, PERO NO HAY MORTALIDAD.

Beneficios Potenciales en DEN

La densidad de la madera de eucalipto es la variable de calidad más estudiada. Se sabe que puede variar significativamente entre especies y en algunos casos, entre procedencias, como se ha demostrado ampliamente en el caso de *E. globulus* (Mac Donald *et al.*, 1997; Miranda *et al.*, 2001; Apiolaza *et al.*, 2005; Stackpole *et al.*, 2010) y *E. nitens* (Clarke, 1999; y Hamilton *et al.*, 2011).

DEN es una variable con alta heredabilidad (Ej. Raymond, 2002), pero baja variabilidad genética, con CV_g entre 5 y 8%. A pesar de eso implica una alta precisión de selección, de cerca de $\rho=0,9$, por otro lado, las ganancias genéticas no deberían superar el 6 a 8% por generación de mejoramiento, lo que sin embargo representa un aumento de densidad de unos 40 Kg/m³. En una planta de celulosa, eso significa un ahorro entre 4 y 10 US\$/t (Cuadro N° 1).

Desafortunadamente, medir directamente la densidad de los árboles implica su tala, para recoger muestras de madera y hacer las mediciones en el laboratorio. En la práctica esto implica una baja intensidad de selección.

Para superar esta limitación, se han propuesto varias estrategias de medición indirecta de la densidad. Las más populares han sido recoger tarugos y determinar su densidad en el laboratorio (Kube y Raymond, 2002), usar el Pilodyn (Greaves *et al.*, 1995; Mac Donald *et al.*, 1997; Raymond y Mac Donald, 1998), el resistógrafo (Isik y Li, 2003; Gantz, 2002) o el NIR (*Reflectancia en el infrarrojo cercano*) a partir de aserrín procedente de tarugos (Schimleck *et al.*, 1999; Schimleck y Evans, 2003; Hein *et al.*, 2009; Hein, 2010).

Todos estos métodos indirectos varían en cuanto a costos, tiempo de medición y precisión. En el cuadro N° 2 se enumeran las principales características de cada método.

Cuadro N° 2
PARÁMETROS DE SELECCIÓN ASOCIADOS A LOS DISTINTOS MÉTODOS
DE MEDICIÓN INDIRECTA DE DENSIDAD

Método de Selección	h^2	r_g con DEN	Tiempo por Muestra
Tarugos	0,5 a 0,7	0,8 a 1,0	5 min + laboratorio
Pilodyn	0,20 a 0,5	0,6 a 1,0	2 min
Resistógrafo	0,3	0,8 a 0,95	8 min
NIR	0,5 a 0,7	0,6 a 0,8	5 min + laboratorio

h^2 : Heredabilidad

r_g : Correlación Genética

Un problema común a todos estos métodos indirectos es que introducen errores de muestreo. Esto ocurre porque la toma de muestras se realiza en general en un único punto en el tronco del árbol. Como la densidad presenta una variación significativa, longitudinal y radialmente (Downes *et al.* 1997), existe el riesgo de que la muestra no sea representativa del árbol. Afortunadamente, la mayoría de los estudios han encontrado correlaciones razonables entre muestras tomadas al DAP o al 10% de su altura y a la altura media del árbol. Para *E. nitens* y *E. globulus*, se encontró valores de correlación entre el método indirecto y la densidad del árbol de cerca de 0,8, lo que corresponde a una precisión de estimación de ± 20 a 30 Kg/m^3 (Greaves *et al.*, 1996; Muneri y Raymond, 1996; Raymond y Mac Donald, 1998; Kube y Raymond, 2002).

Considerando los parámetros genéticos del Cuadro N° 2, se esperan ganancias en densidad, basadas en métodos indirectos, entre el 6 y 8%, por lo tanto, comparables a los métodos directos. Por un lado los métodos indirectos para densidad van a permitir el aumento del número de árboles evaluados, reduciendo los costos y el tiempo de medición, obteniendo un aumento significativo de la intensidad de selección (duplicándola fácilmente), pero, por otro lado, en relación a una evaluación directa, conducen a una pérdida de precisión de selección entre el 50 al 70%. Los beneficios superan claramente a las pérdidas y se puede concluir que se justifica el uso de métodos indirectos de medición de densidad en programas de mejoramiento.

Beneficios Potenciales en REN

En el caso de la selección para rendimiento pulpable hay algunas semejanzas con la explicada para la densidad. Se trata de una variable cuya medición requiere también la tala de los árboles y una evaluación aún más compleja en el laboratorio, pero a diferencia de la densidad, el valor obtenido para REN dependerá de las condiciones de cocción impuestas. Por lo tanto, no es verdaderamente una variable biológica, sino una variable tecnológica que dependerá del protocolo adoptado.

Para una comparación correcta de REN entre distintos árboles, clones o familias, es importante asegurar condiciones absolutamente idénticas de cocción, en particular con respecto al valor de lignina residual en la pulpa, es decir su índice Kappa = IK. Esto no siempre es fácil de garantizar con una sola cocción, por lo que se deben realizar al menos dos cocciones por muestra, de diferentes niveles de lignina residual e interpolar las estimaciones de REN para un valor intermedio fijado para todos los árboles. Desafortunadamente, esto implica la duplicación del número de análisis a realizar y, en consecuencia, de los costos de evaluación. El resultado es que muchos estudios presentan valores de REN con distintos niveles de IK para cada árbol evaluado.

A pesar de estos problemas metodológicos, la heredabilidad de REN ha sido en general de moderada a alta (0,25 a 0,60), aunque sus valores de CV_g sean aún más bajos que para DEN, entre 2 y 5% (Raymond y Apiolaza, 2004).

Debido a las dificultades referidas y a los costos de medición, muy pocos árboles son evaluados para REN en los programas de mejoramiento. En tanto que para VOL fácilmente se dispone de decenas de miles de registros y para DEN de algunos miles, para REN rara vez se tiene más que pocos cientos de mediciones. Con intensidades de selección así de bajas, la ganancia por ciclo será de un 3 a 6%, es decir, entre 0,1 a 0,3 puntos porcentuales, lo que representaría ahorros de 0,5 a 2,5 US\$/t en una planta de celulosa.

De la misma forma que para DEN, esta situación ha cambiado en los últimos años con el desarrollo de métodos indirectos de estimación de REN. Uno de los primeros ha sido evaluar el contenido de celulosa en tarugos (Wallis *et al.*, 1996), un procedimiento más sencillo y barato que para REN, y de una alta correlación con ella. Ejemplos de su aplicación han sido realizados por Raymond *et al.* (2001a), Raymond *et al.* (2001c), Kube *et al.* (2002), Downes *et al.* (2009) o Downes *et al.* (2011). Sin embargo, el avance más importante ha sido el uso de métodos de *Espectroscopía de Infrarrojo Cercano* o NIR (Ej. Raymond *et al.*, 2001c).

La espectroscopia NIR tiene una larga trayectoria en la caracterización de compuestos orgánicos. Se basa en la lectura del espectro que refleja la muestra después de proyectarle una radiación en la gama de longitud de onda del *infrarrojo cercano*, es decir, entre 4.000 y 12.000 cm^{-1} . Esta radiación causa cambios en la rotación y vibración de ciertas moléculas, detectados como bandas o, más raramente, como picos o cimas en el espectro. Esta información espectral se puede cuantificar y su valor se relaciona con mediciones directas, de REN o de otras variables de interés, como se comentó ya para la variable DEN.

En el ajuste de un modelo predictivo entre la información espectral y las mediciones directas, se utilizan técnicas de regresión multivariada, como el PLS (*Partial Least Squares Regression*) o de análisis de componentes principales. Los modelos obtenidos se deben comprobar (validar) con muestras independientes para las cuales también se tengan valores directos de REN. La calidad predictiva de estos modelos NIR se evalúa de acuerdo a su coeficiente de regresión (R^2), su RMSECV (*root mean standard error of cross validation*), o preferiblemente su RPD (*Relative Prediction Deviation*), que es el cociente de la desviación estándar de la variable en las muestras y el RMSECV. Para que un modelo de NIR se pueda considerar robusto y riguroso para efectos de selección indirecta, se han recomendado valores de RPD por encima de 2,5 (un valor no siempre fácil de alcanzar), aunque su relevancia en el programa sea siempre un balance entre la precisión y el aumento de intensidad de selección. Una vez construido un modelo estadístico que relaciona los espectros NIR con REN, se podrá estimar el REN para cada nuevo árbol. Este valor se basa solo en la lectura NIR de pequeñas muestras de madera, por ejemplo las obtenidas de tarugos o aserrín al DAP.

Los valores de heredabilidad de REN basados en NIR han sido similares o en algunos casos superiores al REN medido directamente, con h^2 entre 0,4 y 0,8 (Ej. Raymond *et al.*, 2001b). Además están fuertemente relacionados entre sí, la correlación genética = r_g entre 0,6 y 1,0 (Kube *et al.*, 2001; Kien *et al.*, 2009 o Costa e Silva *et al.*, 2009). El único inconveniente del método NIR, como se ha referido para la densidad, es la existencia de posibles errores de muestreo, con el agravante de que las cantidades de madera necesarias para una lectura NIR son muy pequeñas (menos de 30 g). Sin embargo, Schimleck *et al.* (1998), Kube *et al.* (2002)

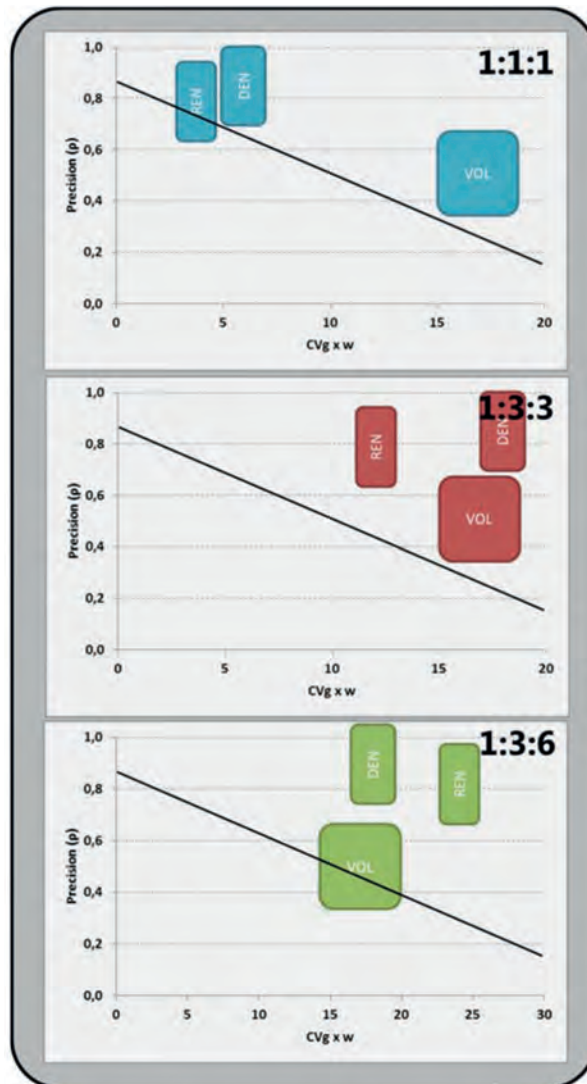
y Downes *et al.* (1997) encontraron correlaciones excelentes entre el REN de todo el árbol y las estimaciones NIR de muestras tomadas a una sola altura (entre 0,92 y 0,86).

En conclusión, la eficiencia de la selección indirecta por NIR resulta casi idéntica a la selección directa de REN, siendo los errores de muestreo posiblemente compensados por una mayor heredabilidad y una correlación genética cercana a uno. Aún más importante, la medición de NIR permite evaluar un número mucho mayor de árboles, aumentando significativamente la intensidad de selección.

Relevancia de Cada Variable para el Criterio de Selección

Comparando los beneficios potenciales asociados a cada variable en el criterio de selección *per se*, se puede concluir que las variables relacionadas con la calidad de la madera (DEN y REN) tienen por un lado una alta precisión de selección, pero por otro una menor variabilidad respecto a VOL. Estos dos efectos prácticamente se anulan y el resultado es que las distintas variables van a tener un impacto muy parecido en las ganancias observadas en un programa de selección. En el caso simplificado de seleccionar solamente una de las tres variables claves, la preferencia variará según el peso económico asignado a cada una, como se muestra en la Figura N° 9. Si las variables tienen pesos iguales (1: 1: 1), como sería el caso de maximizar la producción de pulpa por hectárea, la selección para DEN o VOL será preferible. Si DEN y REN son 3 veces más importantes que VOL (1:3:3), como ocurrirá en el caso de minimizar costos de producción de pulpa, DEN será preferible, a VOL o REN, y si REN es mucho más importante que VOL y algo más que DEN (1:3:6), como en el caso de maximizar los beneficios en una planta de celulosa a corto plazo, la selección deberá favorecer DEN o REN, en vez de VOL.





La línea representa valores de ganancia genética equivalentes, para una misma intensidad de selección.
 Las situaciones representadas corresponden a ponderaciones relativas entre VOL, DEN y REN de 1:1:1, 1:3:3 y 1:3:6.

Figura N° 9

LA IMPORTANCIA PARA LA SELECCIÓN, DE CADA UNA DE LAS VARIABLES CLAVE EN FUNCIÓN DE LOS RESPECTIVOS VALORES ESPERADOS DE PRECISIÓN DE SELECCIÓN (ρ) Y DEL COEFICIENTE DE VARIACIÓN GENÉTICA (CV_g), MULTIPLICADO POR SU PESO ECONÓMICO RELATIVO (w).

Es curioso observar que, en todos los escenarios, DEN aparece como la o una de las variables más importantes, este es un dato relevante para ayudar a priorizar los criterios de medición y selección en el programa de mejora (Greaves *et al.* 1997a). Sin embargo, en una selección multivariada, Smith (1983) demostró que para mantener eficiencias altas de selección, es esencial que el índice no excluya ninguna de las variables consideradas clave, incluso si las ponderaciones utilizadas son meramente indicativas. En el caso de la producción de celulosa, significa que se deberán incluir, siempre que sea posible, mediciones directas

o indirectas de VOL, DEN y REN, al menos para la gran mayoría de los árboles candidatos. Según Borralho *et al.* (1993) o Greaves *et al.* (1997a), una selección para minimizar costos de pulpa basada solo en VOL resultaría en 35 a 62% de las ganancias esperadas en relación a una selección que combina todas las variables. Esto es consecuencia sobre todo de que las tres variables clave (VOL, DEN y REN) son prácticamente independientes entre sí, y todas tienen una alta importancia, por lo tanto la selección de una no daría lugar a cambios en la otra.

El impacto económico de un ciclo de selección genética que incluya VOL, DEN y REN, sea por métodos directos o indirectos, y con intensidades de selección típicas de mejoramiento forestal (de 1 a 5%), se traduce en un ahorro en una generación de mejoramiento de alrededor de 20 a 25 US\$/t (Ej. Greaves *et al.*, 1997a), lo que equivale de 7 a 10% de los costos finales de producción, a lo que hay que agregar eventuales beneficios de aumento de producción de pulpa o energía. Para una planta de un millón de toneladas al año, eso representa 20 millones de dólares al año.

Otros Orígenes de Ineficiencias. Selección Precoz e Interacción Genotipo-Ambiente

Hay algunos aspectos particulares, además de los ya mencionados, que pueden afectar los beneficios en un programa de mejora. Se mencionarán dos en particular: (i) Cuando la selección se realiza en edades muy tempranas y (ii) Si ocurren interacciones genotipo-ambiente, en particular entre condiciones ambientales o silvícolas de los ensayos y de su uso comercial.

En el eucalipto, con ciclos de producción de 6 a 12 años, las correlaciones genéticas entre edades juveniles y el fin del ciclo son en general muy altas ($r > 0,8$) para VOL (Borralho *et al.*, 1992b; Osorio *et al.*, 2003; Costa e Silva *et al.*, 2006) y aún más para DEN (Greaves *et al.*, 1997b; Muneri y Raymond, 2000; Stackpole *et al.*, 2010; Costa e Silva *et al.*, 2009; Hamilton *et al.*, 2010; Osorio *et al.*, 2001). Se supone que lo mismo ocurre para REN, aunque los resultados son todavía escasos (Ej. Hamilton *et al.*, 2009). Como conclusión, las mediciones de crecimiento y densidad podrán ser realizadas por lo menos a partir de los dos años de edad, como ha sido sugerido por Borralho *et al.* (1992b) y Greaves *et al.* (2003).

La interpretación de la interacción genotipo-ambiente (GE) es más compleja y sobre todo difícil de extrapolar. Para VOL, la interacción GE ha sido inconsistente entre estudios, sin embargo se puede generalizar que su magnitud para VOL en eucalipto y en particular para los *E. globulus* y *E. nitens*, es baja a moderada.

En el detallado estudio de Costa e Silva *et al.* (2006) para *E. globulus*, se encontró correlaciones genéticas entre ensayos, de 0,6 a 0,9, aunque hay algunas excepciones. Ellas se deben a la presencia de factores restrictivos al crecimiento, como plagas, enfermedades o daños de heladas, que afectan el resultado en unos ensayos y no en otros, pero no siempre hay una justificación clara para las interacciones observadas. Al revés, las variables de calidad de la madera (DEN y REN) han demostrado tener sistemáticamente bajas interacciones entre distintas localidades (Ej. Hamilton *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2007; Osorio *et al.*, 2001; Raymond *et al.*, 2001b; Lima *et al.*, 2000).

Cuanto más importante sean DEN y REN en el objetivo de mejoramiento, menos relevante será el tema de las interacciones genotipo-ambiente. En conclusión, la presencia

de eventuales interacciones GE, de características o límites desconocidos, corresponde a un error experimental de causas desconocidas y que hay que minimizar garantizando un número de ensayos genéticos adecuados (Lindgren, 1985) y en situaciones bien representativas del rango de condiciones ecológicas.

COMPATIBILIDAD ENTRE PULPA Y OTROS USOS

Aunque la mayoría de las áreas de plantación de eucalipto están destinadas a la producción de celulosa y esta situación persistirá en las próximas décadas, ha habido un aumento significativo de usos alternativos para su madera. En este contexto se puede incluir madera contrachapada, productos de fibra de densidad media (MDF) y de partículas orientadas o *Oriented Strand Boards* (OSB). La madera sólida es revisada en los Capítulos 18 a 21. En los casos de la industria de MDF y OSB, la madera representa un costo proporcionalmente superior con respecto al total (alcanza al 65% de los costos finales), comparado a lo que se observa en una planta de celulosa (que varía de 25 a 40%). Además, en el proceso industrial de MDF u OSB, los restantes costos están relacionados con la energía necesaria para secar la madera. Así, para minimizar los costos de la madera y de procesamiento, se espera que VOL y DEN sean las principales variables clave, mientras REN tiene poca o ninguna relevancia.

Como ya se ha mencionado, la cogeneración de energía y la integración en las plantas de celulosa de bio-refinerías destinadas a la producción de biocombustibles o productos químicos de alto valor agregado, son aspectos que se están considerando cada vez como más importantes para el futuro del sector. Eso va a abrir nuevas perspectivas sobre qué tipo de madera y qué variables de su calidad serán más interesantes en una industria integrada (pulpa + energía). En el caso particular de cogeneración de energía por la quema de licor negro, su valor es inversamente proporcional a REN (Greaves y Borralho, 1996):

$$V_{\text{Energía}} \propto (1 - \text{REN}) / \text{REN}$$

Eso implica que para una mayor producción de energía, hay una menor producción de pulpa, una optimización difícil de lograr y que será determinada por los precios y demanda de energía versus papel. Las posibles implicaciones de incorporar en la cadena de producción una componente de bio-refinería son aún más complejas y se ubican en un horizonte temporal más lejano. Su discusión sobrepasa el objetivo de este capítulo.

En estos ejemplos de uso alternativo o complementarios a la pulpa (Ej. MDF, OSB y la cogeneración de energía por combustión de licor negro), se encontró que el peso económico de REN disminuirá en relación a VOL y DEN. Aunque la estrategia de mejoramiento genético (la determinación de peso económico y definición de criterios de selección) debe hacerse según la estructura de costos relevantes a la planta u organización específica y actual, estas decisiones van a tener un impacto en todo el mercado y a largo plazo. Por lo tanto es razonable sugerir que será estratégicamente aconsejable concentrar los esfuerzos de selección en las variables que parecen ser relevantes a la más amplia gama posible de usos futuros de la madera. En el caso de las plantaciones de eucalipto, estas variables son más que todo, VOL y DEN. Al contrario, REN es importante en ciertos escenarios, en particular para rentabilizar la actividad económica de una planta de celulosa en el corto plazo, pero poco o nada en otros escenarios.

CONCLUSIONES

Los productores de pulpa de eucalipto deberán continuar sintiendo la presión para reducir sus costos, a medida que más y mejores plantas de celulosa y plantaciones cada vez más intensivas de eucalipto se van construyendo y estableciendo, respectivamente. Para lograrlo, es fundamental un aumento de la productividad forestal y mejoras en la calidad de la madera. El mejoramiento genético es una estrategia muy eficaz para lograrlo, porque permite cambiar efectivamente variables que son clave en los costos de la madera y de su transformación en pulpa.

Del análisis de las funciones de producción teórica y de resultados obtenidos en plantas específicas, se puede concluir que el volumen por hectárea, el rendimiento en pulpa y la densidad de la madera son variables igualmente importantes. Sin embargo, su importancia relativa varía de caso a caso. Por ejemplo, el rendimiento pulpable es la variable más importante para maximizar la rentabilidad de una planta en el corto plazo, mientras que en el largo plazo, volumen por hectárea y densidad de madera son las más relevantes. Sin embargo, los tres deben incluirse en el criterio de selección de un programa efectivo de mejora. Según los parámetros genéticos típicos de eucaliptos, las ganancias esperadas con la selección simultánea de estas tres variables, resultará en una reducción de 7 a 10% en los costos finales de producción de pulpa, por generación de mejora, algo que representa unos 20 millones de dólares de ahorro para una fábrica de un millón de toneladas anuales.

Estas conclusiones podrán cambiar en el futuro. Nuevas oportunidades de negocio en la industria de la pulpa, tales como la co-generación de energía a partir de la biomasa, tanto de madera como de corteza, o la integración de refinerías químicas, van a modificar la importancia económica relativa de estas tres variables o introducir otras nuevas. Además, empiezan a surgir nuevos usos industriales para la madera de eucalipto, con distintos requerimientos. En general, la productividad forestal y la densidad de la madera se mantendrán relevantes para todos los escenarios probables de uso futuro de la madera de eucalipto. Al revés, la importancia de un alto rendimiento pulpable y, por lo tanto, de la naturaleza de la composición química de la madera, va a depender del uso futuro de madera sea el papel o la bioenergía.

AGRADECIMIENTOS

Mucho de lo que se presentó en este capítulo ha sido resultado de discusiones sostenidas con gerentes, forestales, genetistas y estadísticos en múltiples rincones del mundo. Entre ellos, se agradece en especial las contribuciones científicas de Bruce Greaves, Paul Chambers, Luis Apiolaza y Carolyn Raymond, respecto a la definición de objetivos y criterios de selección, a Brad Potts, Peter Volker, Greg Dutkowski y João Costa e Silva, en relación a la genética cuantitativa de eucaliptos y, por compartir la experiencia y los resultados en sus programas de mejoramiento, a Verónica Emhart, Edgardo Velilla y colegas de MININCO, a Roberto Ipinza y colegas de INFOR, a Juan Lopez y colegas de INIA, a Rogério de Aguiar de MUNDIAL FORESTACIÓN, a Gleison do Santos de CMPC Brasil, a José Araújo de RAIZ y a Clara Araújo de SILVICAIMA, entre muchos otros.

REFERENCIAS

- Apiolaza, L. A.; Raymond, C. A. and Yeo, B. J., 2005.** Genetic variation of physical and chemical wood properties of *Eucalyptus globulus*. *Silvae genetica*:160-166.
- Araújo, J. A.; Sousa, R.; Lemos, L. and Borralho, N. M. G., 1996.** Estimates of genetic parameters and prediction of breeding values for growth in *Eucalyptus globulus* combining clonal and full-sib information. *Silvae genetica* 45:223-226.
- Barrios, A.; López, A. M. y Nieto, V. M., 2008.** Influencia del diámetro medio del rodal y las distancias medias de extracción en los costos de un sistema de cosecha en bosques de *Eucalyptus globulus* en la zona central de Chile. *Revista Colombia Forestal* 11:83-92.
- Bassa, A.; Sacon, V. M. and Valle, C. F., 2005.** Selección y caracterización de clones de eucalipto considerando parámetros silviculturales, tecnológicos y de producto final. Paper presented at the II Coloquio Internacional sobre Celulosa de Eucalipto, Concepción, Chile.
- Borralho, N. M. G.; Cotterill, P. P. and Kanowski, P. J., 1992a.** Genetic parameters and gains expected from selection for dry weight in *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* in Portugal. *Forest Science* 38:80-94.
- Borralho, N. M. G.; Kanowski, P. J. and Cotterill, P. P., 1992b.** Genetic control of growth of *Eucalyptus globulus* in Portugal. II. Efficiencies of early selection. *Silvae genetica* 41 (1):70-77.
- Borralho, N. M. G.; Cotterill, P. P. and Kanowski, P. J., 1993.** Breeding objectives for pulp production of *Eucalyptus globulus* under different industrial cost structures. *Canadian Journal of Forest Research* 23:648-656.
- Burla, E. R., 2008.** Avaliação Técnica e Econômica do "Harvester" na Colheita do Eucalipto. MSc Thesis, Universidade Federal de Viçosa.
- Cappa, E. P.; Pathauer, P. S. and Lopez, G. A., 2010.** Provenance variation and genetic parameters of *Eucalyptus viminalis* in Argentina. *Tree Genetics and Genomes* 6:981-994.
- Chambers, P. G. S.; Borralho, N. M. G. and Potts, B. M., 1996.** Genetic analysis of survival in *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus*. *Silvae genetica* 45:107-112.
- Chambers, P. G. S. and Borralho, N. M. G., 1997.** Importance of survival in short-rotation tree breeding programs. *Canadian Journal of Forest Research* 27:911-917.
- Clarke, C. R. E., 1999.** Wood and pulp properties of four New South Wales provenances of *E. nitens* grown on a warm and a cold site in South Africa. In: *Silvotecnica XII Eucalyptus in Chile: Present and Future (Silviculture and Industrial Use)*, Concepcion, Chile, 26-27 August 1999.
- Cornelius, J., 1994.** Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest trees. *Canadian Journal of Forest Research* 24:372-379.
- Costa-e-Silva, J. and Dutkowski, G., 2006.** Genotype by environment interaction for growth of *Eucalyptus globulus* in Australia. *Tree Genetics & Genomes* 2 (2):61-75.
- Costa-e-Silva, J.; Borralho, N. M. G.; Araújo, J. A.; Vaillancourt, R. E. and Potts, B. M., 2009.** Genetic parameters for growth, wood density and pulp yield in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes* 5 (2):291-305. doi:10.1007/s11295-008-0174-9.
- Cotterill, P. P. and Mc Rae, S., 1997.** Improving *Eucalyptus* pulp and paper quality using genetic selection and good organization. *Tappi Journal* 80 (6):82-89.
- Downes, G. M.; Hudson, I. L.; Raymond, C. A.; Dean, G. H.; Michell, A. J.; Schimleck, L. R.; Evans, R. and Muneri, A., 1997.** Sampling plantation Eucalypts for wood and fiber properties. CSIRO Publishing, Collingwood, Australia.

Downes, G.M.; Catela, F. and Meder, R., 2009. Developing and evaluating a multisite and multispecies NIR calibration for the prediction of kraft pulp yield in Eucalypts. *Southern Forests* 71 (2):155-164.

Downes, G. M.; Meder, R.; Bond, H.; Ebdon, N.; Hicks, C. and Harwood, C., 2011. Measurement of cellulose content, Kraft pulp yield and basic density in Eucalypt woodmeal using multisite and multispecies near infra-red spectroscopic calibrations. *Southern Forests* 73 (3-4):181-186.

Fonseca, S. M.; Oliveira, R. C. and Silveira, P. N., 1995. Industrial tree selection: procedures, risks, costs and benefits. In: B.M. Potts NMGB, J.B. Reid, R.N. Cromer, W.N. Tibbits and C.A. Raymond (ed) *Eucalyptus* plantations: Improving Fibre Yield and Quality, Hobart, Australia, 1995. CRC-IUFRO, pp 14-19.

Gantz, C. H., 2002. Evaluating the Efficiency of the Resistograph to Estimate Genetic Parameters for Wood Density in Two Softwood and Two Hardwood Species. North Carolina State University.

Greaves, B. L. and Borralho, N. M. G., 1996. The influence of basic density and pulp yield on the cost of Eucalypt kraft pulping: a theoretical model for tree breeding. *Appita Journal* 49:90-95.

Greaves, B. L.; Borralho, N. M. G. and Raymond, C. A., 1997a. Breeding objective for plantation Eucalypts grown for production of kraft pulp. *Forest Science* 43:465-472.

Greaves, B. L.; Borralho, N. M. G. and Raymond, C. A., 2003. Early selection in Eucalypt breeding in Australia – optimum selection age to minimize the total cost of kraft pulp production. *New Forests* 25 (3):201-210.

Greaves, B. L.; Borralho, N. M. G.; Raymond, C. A. and Farrington, A., 1995. Use of a pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. In: B.M.Potts NMGB, J.B.Reid, R.N.Cromer, W.N.Tibbits and C.A.Raymond (ed) *Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality*, Hobart, Australia, 1995. CRC-IUFRO, pp 106-109.

Greaves, B. L.; Borralho, N. M. G.; Raymond, C. A. and Farrington, A., 1996. Use of Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research* 26 (9):1643-1650.

Greaves, B. L.; Borralho, N. M. G.; Raymond, A.; Evans, R. and Whiteman, H., 1997b. Age-age Correlations in, and Relationships between Basic Density and Growth in *Eucalyptus nitens*. *Silvae Genetica* 46 (5):264-270.

Hamilton, M. G.; Dutkowski, G.; Joyce, K. and Potts, B. M., 2011. Meta-analysis of racial variation in *Eucalyptus nitens* and *E. denticulata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 41:217-230.

Hamilton, M. G.; Potts, B. M.; Greaves, B. L. and Dutkowski, G. W., 2010. Genetic correlations between pulpwood and solid-wood selection and objective traits in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science* 67 (Article 511):10 pp.

Hamilton, M. G.; Raymond, C. A.; Harwood, C. E. and Potts, B. M., 2009. Genetic variation in *Eucalyptus nitens* pulpwood and wood shrinkage traits. *Tree Genetics & Genomes* 5:307-316.

Hardner, C. and Tibbits, W. N., 1998. Inbreeding depression for growth, wood and fecundity traits in *Eucalyptus nitens*. *Forest Genetics* 5 (1):11-20Hein, PRG. 2010. Multivariate regression methods for estimating basic density in *Eucalyptus* wood from near infrared spectroscopic data. *Cerne* 16:90-96.

Hein, P. R. G.; Lima, J. T. and Chaix, G., 2009. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 17 (3):141-150.

Hein, P. R. G. 2010. Multivariate regression methods for estimating basic density in *Eucalyptus* wood from near infrared spectroscopic data. *Cerne* 16: 90-96

Isik, F. and Li, B., 2003. Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. *Canadian Journal of Forest Research* 33:2426-2435

Kien, N. D.; Quang, T. H.; Jansson, G.; Harwood, C.; Clapham, D. and Arnold, S., 2009. Cellulose content as a selection trait in breeding for kraft pulp yield in *Eucalyptus urophylla*. *Annals of Forest Science* 66 (7):711.

- Korpunen, H.; Virtanen, P.; Dahl, O.; Jylhä, P. and Uusitalo, J., 2012.** An activity-based cost calculation for a kraft pulp mill. *Tappi Journal* 11 (9):19-24.
- Kube, P. D.; Raymond, C. A. and Banham, P. W., 2002.** Prediction of whole-tree basic density and pulp yield using wood core samples in *Eucalyptus nitens*. *Appita Journal* 55 (1):43-48.
- Kube, P. D.; Raymond, C. A. and Banham, P. W., 2001.** Genetic parameters for diameter, basic density, cellulose content and fibre properties for *Eucalyptus nitens*. *Forest Genetics* 8 (4):285-294.
- Li, Y.; Dutkowski, G. W.; Apiolaza, L. A.; Pilbeam, D.; Costa-e-Silva, J. and Potts, B. M., 2007.** The genetic architecture of a *Eucalyptus globulus* full-sib breeding population in Australia. *Forest Genetics* 12 (3):167-179.
- Lima, J. T.; Breese, M. C. and Cahalan, C. M., 2000.** Genotype-environment interaction in wood basic density of *Eucalyptus* clones. *Wood Science and Technology* 34 (3):197-206.
- Lindgren, D., 1985.** Cost-Efficient Number of Test Sites for Ranking Entries in Field Trials. *Biometrics*, Vol. 41 (4): 887-893
- Lopez, J.; Gomide, J. L. and Phillips, R., 2009.** Impacto da qualidade da madeira de eucalipto no desempenho financeiro de um modelo de fábrica brasileira de celulose. *O Papel* 70 (7):53-71.
- MacDonald, A. C.; Borralho, N. M. G. and Potts, B. M., 1997.** Genetic variation for growth and wood density in *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* in Tasmania (Australia). *Silvae genetica* 46:236-241.
- Magaton, A.; Colodette, J.; Pilo-Veloso, D. and Gomide, J., 2011.** Behavior of *Eucalyptus* Wood Xylans across Kraft Cooking. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 31 (1):58-72. doi:10.1080/02773813.2010.484123.
- Miranda, I.; Almeida, M. H.; and Pereira, H., 2001.** Provenance and site variation of wood density in *Eucalyptus globulus* Labill. at harvest age and its relation to a non-destructive early assessment. *Forest Ecology and Management*, vol 149.
- Muneri, A.; and Raymond, CA. 1996.** Basic density in *E. globulus* and *E. nitens*. Within tree variation and sampling recommendations. CRCTHF.
- Muneri, A.; and Raymond, C. A., 2000.** Genetic parameters and genotype-by-environment interactions for basic density, pilodyn penetration and stem diameter in *Eucalyptus globulus*. *Forest Genetics* 7 (4):317-328.
- Osorio, L. F.; White, T. L.; and Huber, D. A., 2001.** Age Trends of Heritabilities and Genotype-by-Environment Interactions for Growth Traits and Wood Density from Clonal Trials of *Eucalyptus grandis* HILL ex MAIDEN. *Silvae genetica* 50 (3-4):108-117.
- Osorio, L. F.; White, T. L.; and Huber, D. A., 2003.** Age-age and trait-trait correlations for *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and their implications for optimal selection age and design of clonal trials. *Theor Appl Genet* 106 (4):735-743.
- Otegbeye, G. O. and Kellison, R. C., 1980.** Genetics of wood and bark characteristics of *Eucalyptus viminalis*. *Silvae genetica* 29 (1):27-34.
- Paavilainen, L., 2000.** Quality-competitiveness of Asian short-fibre raw materials in different paper grades. *Paper and Timber* 82 (3):156-161.
- Pesek, J. and Baker, R. J., 1969.** Desired improvement in relation to selection indices. *Canadian Journal of Plant Science* 49:803.
- Quilhó, T. and Pereira, H., 2001.** Within and between-tree variation of bark content and wood density of *Eucalyptus globulus* in commercial plantations. *IAWA Journal* 22 (3):255-265.
- Raymond, C. A.; Greaves, B. L., 1997.** Developing breeding objectives for kraft and cold caustic soak (CCS) pulping of Eucalypts. Paper presented at the Proc CTIA/IUFRO International Wood Quality Workshop on "Timber Management Toward Wood Quality and End-Product Value", Quebec City, Canada, August 18-22 1997.

- Raymond, C. A.; Mac Donald, A. C., 1998.** Where to shoot your pilodyn: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forests* 15 (3):205-221.
- Raymond, CA.; Schimleck, LR.; Muneri, A.; and Michell, AJ. 2001a.** Genetic parameters and genotype-by-environment interaction for predicted pulp yield and pulp productivity in *Eucalyptus globulus*. *Forest Genetics* 8:213-224.
- Raymond, C. A.; Schimleck, L. R.; Muneri, A.; and Michell, A. J., 2001b.** Genetic parameters and genotype-by-environment interactions for pulp yield predicted using near infrared reflectance analysis and pulp productivity in *Eucalyptus globulus*. *Forest Genetics* 8 (3):213-224.
- Raymond, C. A.; Schimleck, L. R.; Muneri, A.; and Michell, A. J., 2001c.** Non-destructive sampling of *Eucalyptus globulus* and *E.nitens* for wood properties. III. Predicted pulp yield using near infrared reflectance analysis. *Wood Science and Technology* 35:203-215
- Raymond, C. A., 2002.** Genetics of *Eucalyptus* wood properties. *Annals of Forest Science* 59:525-531.
- Raymond, C. A.; Apiolaza, L. A., 2004.** Incorporating wood quality and deployment traits in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. In: *Plantation Forest Biotechnology for the 21st Century*. Research Signpost, Kerala, India, pp 87-99.
- Sanhueza, RP.; White, TL.; Huber, DA.; and Griffin, AR. 2002.** Genetic parameters estimates, selection indices and predicted genetic gains from selection of *Eucalyptus globulus* in Chile. *Forest Genetics* 9 (1):19-29.
- Schimleck, L. R.; and Evans, R., 2003.** Estimation of air-dry density of increment cores by near infrared spectroscopy. *Appita Journal* 56:312-317.
- Schimleck, L. R.; Michell, A. J.; Raymond, C. A.; Muneri, A., 1998.** Assessment of the pulpwood quality of standing trees using near infrared spectroscopy. *Journal of Near Unfrared Spectroscopy* 6 (A):117-123
- Schimleck, L. R.; Michell, A. J.; Raymond, C. A.; and Muneri, A., 1999.** Estimation of basic density of *Eucalyptus globulus* using near-infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Reseach* 29 (2):194-201.
- Smith, C., 1983.** Effects of changes in economic weights on the efficiency of index selection. *Journal of Animal Science* 56 (5):1057-1064.
- Stackpole, D. J.; Vaillancourt, R. E.; and Aguigar, M. B. M. P., 2010.** Age trends in genetic parameters for growth and wood density in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes* 6:179-193.
- Volker, P. W.; Owen, J. V; and Borralho, N. M. G., 1995.** Genetic variances and covariances for frost tolerance in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *Silvae genetica* 43:366-372.
- Volker, P. W.; Dean, C. A.; Tibbits, W. N.; and Ravenwood, I. C., 1989.** Genetic parameters and gains expected from selection in *Eucalyptus globulus* in Tasmania. *Silvae Genetica* 39 (1):18-.21.
- Wallis, A. F. A.; Wearne, R. S; and Wright, P. J., 1996.** Analytical characteristics of plantation Eucalypt woods relating to kraft pulp yields. *Appita Journal* 49 (6):427-432.
- Wei, X. and Borralho, N. M. G., 1997.** Genetic control of wood basic density and bark thickness and their relationships with growth traits of *Eucalyptus urophylla* in South East China. *Silvae genetica* 46 (4-5):245-249.
- Wei, X. and Borralho, NMG. 1999.** Objectives and selection criteria for pulp production of *Eucalyptus urophylla* plantations in South East China. *Forest Genetics* 6 (3):181-190.
- Woolaston, R. R.; Jarvis, S. F., 1995.** The importance of breeding objectives in forest tree improvement. In: BM. Potts; NMG. Borralho; JB. Reid; RN. Cromer; WN. Tibbits and Raymond, CA. (ed). *Proceedings, CRC-IUFRO Conference, Hobart, Australia, 1995. CRC for Temperate Hardwood Forestry*, pp 184-188.

18. PROTOTIPO VISUAL DE *Eucalyptus nitens* IDÓNEO PARA USO INDUSTRIAL

Roberto Ipinza C.¹
Patricio Salazar²
Braulio Gutiérrez C.³
Carlos Buchner A.³

INTRODUCCION

El concepto calidad de la madera puede definirse como el grado de excelencia, en relación a una aplicación pre-concebida, de cada trozo, pieza o fibra de madera (Savidge, 2003). Según Lima (2005) y Chies (2005) la calidad de la madera es el conjunto de características físicas, mecánicas, químicas y anatómicas que confieren la aptitud a la madera para un determinado uso final.

Estas definiciones denotan que el concepto no es absoluto, que depende de variables de interés en la utilización final de la madera y que no existe una única forma de medirlo.

El aprovechamiento industrial del bosque requiere de árboles rectos y cilíndricos, con madera homogénea, ojalá sin defectos, pero tratándose de un material biológico esto es difícil de conseguir.

En general, las características morfológicas externas de un árbol son relativamente fáciles de reconocer, pero por el contrario, los caracteres internos de su madera, que son los que valorizan el producto final, no son fácilmente perceptibles y en ocasiones no se pueden reconocer.

Estas características, que aparecen una vez cortado el árbol, tienen una importancia que varía en función del producto a fabricar.

Sobre este tema, el presente capítulo busca detallar las características claves que permitan identificar, en el árbol en pie, a los individuos más apropiados para su posterior uso industrial en la producción de madera sólida. Particularmente, pretende establecer una pauta con orientaciones prácticas, que ayuden en una primera instancia a la fase silvícola - industrial o ser parte de un proceso de selección de los árboles superiores, que juntos a mecanismos de comparación de árboles o establecimiento de líneas bases y/o valores genéticos pueden ser incorporados a un programa de mejoramiento genético destinado a mejorar el aprovechamiento industrial de la madera sólida. Para este último aspecto las variables a considerar deberán tener necesariamente variación controlada genéticamente e incidencia económica en el proceso de transformación.

1 Ingeniero Forestal, Dr. Ingeniero de Montes, Instituto Forestal, Sede Valdivia. robertoipinza@infor.cl

2 Ingeniero Forestal, especialista en Tecnología de la Madera. p.salazar@vtr.net

3 Ingenieros Forestales Investigadores Instituto Forestal bgutierr@infor.cl y cbuchner@infor.cl

CARACTERÍSTICAS CLAVES

En general, las características deseables de un árbol destinado a uso industrial son las siguientes:

Fuste:	Recto y único, sin bifurcaciones, Cilíndrico Diámetro (DAP = diámetro a la altura del pecho mínimo) mayor a 30cm. Sin fibra revirada Ausencia de ramas en el tronco principal Crecimiento vertical, no inclinado. Corteza sana, sin ataque de hongos, sin galerías de insectos ni desprendimientos de corteza.
Copa:	Simétrica, Reducida al tercio o mitad de la altura, Hojas sanas
Madera homogénea:	Sin pudriciones, sin bolsas de resina e idealmente sin nudos

Las características visuales y motivos más importantes para aceptar o descalificar a un individuo candidato a selección son descritos a continuación.

Fuste

Es el primero y más importante elemento a evaluar. Aquí se busca el mayor volumen posible de madera sana y homogénea, no tener que descontar defectos y así concentrar el *mix* de productos fabricados en los de mejor calidad y más alto valor, de manera que su rentabilidad sea óptima y facilite generar márgenes competitivos.

- Recto, Único y Sin Bifurcaciones

Estas características están orientadas a concentrar el volumen de madera en uno solo fuste y no en dos o más de menor tamaño. Un fuste de estas características resulta más fácil de procesar, permitiendo poner en el equipo procesador un volumen mayor de madera de una sola vez, evitando los tiempos muertos asociados a cargar más fustes de menor tamaño.

Por otra parte, los fustes rectos evitan las pérdidas de madera asociadas al procesamiento de trozas curvas. Estas últimas, si bien pueden ser aprovechadas dividiéndolas en secciones de menor tamaño para disminuir su curvatura (Figura N° 1), producen una pérdida de madera y de eficiencia del proceso de transformación por requerir mayor manipulación de las trozas.

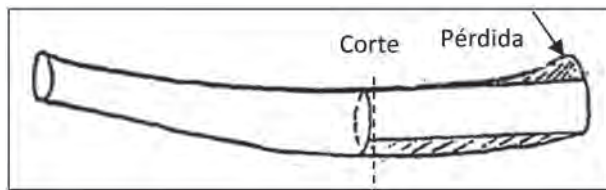


Figura N° 1
PÉRDIDA DE MADERA AL PROCESAR TROZOS CURVOS

- **Cilíndrico**

El trozo cilíndrico se presta mejor para su aprovechamiento tanto en aserrío como debobinado. Con formas geométricas definidas se puede saber el volumen exacto, en caso contrario solo se podrán hacer cálculos aproximados en el aserrío.

Los trozos cilíndricos, por oposición a los cónicos, permiten una mejor programación de producción a través de los esquemas de corte según diámetro y según producto. El debobinado es la forma ideal de procesar. De hecho, el torno debe cilindrar el trozo cuando este no es perfectamente cilíndrico. Es deseable un fuste sin contrafuertes basales que, además de revelar problemas o defectos por causa de la humedad, también aumentan la conicidad. Con la conicidad se puede proceder de manera análoga a la curvatura. El corte permite disminuirla al eliminarse en base al diámetro menor (Figura N° 2).

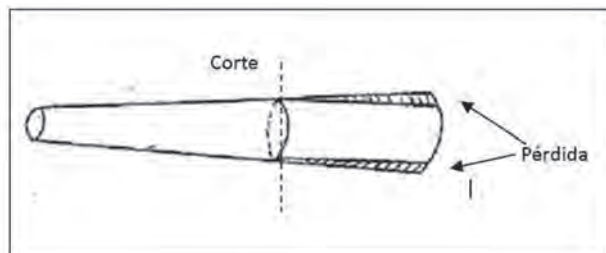


Figura N° 2
PÉRDIDA DE MADERA EN PROCESAMIENTO DE FUSTES CÓNICOS

Tanto en el aserrío como en el debobinado las aristas de la base del cono deben ser eliminadas. El desecho se puede aprovechar como astillas pulpables o combustible, aunque ambos subproductos son de menor valor.

Otro defecto dentro de este ítem son las hendiduras. Aunque este problema no es tan importante en aserrío como en debobinado, en ambos es una troza de menor valor.

- **Diámetro (DAP) Mayor a 30 cm**

Por la relación volumen procesado y producto obtenido, procesar un trozo de diámetro menor a 30 cm es poco eficiente tanto para aserrío como para debobinado. El volumen de desecho resultante es muy alto con respecto al volumen de producto que se puede obtener del trozo.

Ocasionalmente, se podría procesar trozos de hasta 28 cm de diámetro, pero solo si el fuste es perfectamente recto y cilíndrico, aún así, como regla general los árboles de DAP menor a 30 cm es mejor dejarlos crecer.

Otra razón para procesar diámetros mayores se debe que al cargar la máquina con un volumen de madera mayor hay menos tiempos muertos de carguío, mejorando la eficiencia de la producción.

En la actualidad la tendencia es usar diámetros cada vez menores por la rapidez de la rotación de los bosques y al usar maquinaria para diámetros pequeños, el límite lo marca la eficiencia. Los márgenes de rentabilidad con diámetros pequeños son más bajos.

- **Sin Fibra Revirada**

La fibra revirada produce torceduras en las piezas de madera. Es fácilmente distinguible por la forma espiralada del fuste (Figura N° 3).



Figura N° 3
FUSTE DE FIBRA REVIRADA

La madera de los árboles que presentan este defecto es quebradiza, poco densa y elástica. Podría tener algún uso como postes, pero en general es mejor desecharla o destinarla a combustible.

En piezas elaboradas el defecto se manifiesta por un alabeo helicoidal de la pieza en torno a su eje longitudinal (Figura N° 4). Esta deformación se mide como la distancia (mm) de una esquina de la cara a una superficie plana sobre la cual están apoyadas las otras tres esquinas. Es una pieza de menor valor.

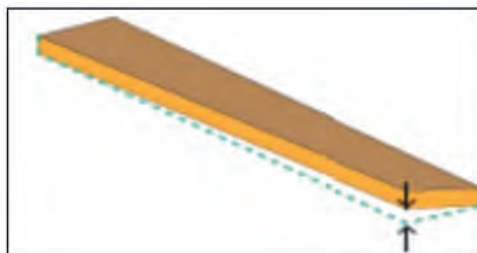


Figura N° 4
ALABEO DEBIDO A FIBRA REVIRADA

- **Ausencia de Ramas en el Tronco Principal**

Esta característica indica que la madera está libre de nudos y, en caso de tenerlos, se trata de nudos firmes que no necesitan tratamiento posterior. Es importante determinar la calidad de la poda, ya que una poda correctamente ejecutada debe tener una cicatrización limpia, sin exudación de resina (Figura N° 5)



Figura N° 5
CICATRIZACIÓN DE PODA

Si el fuste no presenta una adecuada cicatrización y un aspecto similar al de la Figura N° 5, entonces es posible la presencia de pudrición interna y bolsas de resina que descalifican la madera.

Es deseable que el individuo evaluado tenga un fuste recto y limpio de ramas, con un largo de al menos 5 metros, de manera de poder obtener dos trozas de 2,5 metros de largo cada una.

- **Crecimiento Vertical, no Inclinado**

Cuando el árbol, por cualquier circunstancia, no tiene un crecimiento vertical, es indicio de presencia de madera de tensión. No se aprecia desde el exterior, pero su médula es excéntrica, lo que origina irregularidades en el crecimiento.

Lo que sí se puede ver es la forma de la sección del fuste, que tiende a ser ovalada. En el secado la madera de tensión sufre una contracción muy superior a la normal. Esta contracción excesiva provoca una merma en la producción, especialmente en el caso de chapas debobinadas.

Copa

- **Simétrica y Reducida al Tercio o Mitad de la Altura**

En un individuo sano, una copa simétrica es indicio de madera sana, sin tensiones de crecimiento. La concentración de la copa en la sección más alta del árbol permite disponer de una mayor porción de fuste limpio, sin ramas, ni nudos que descalifiquen la calidad de la madera. El aspecto buscado en un árbol candidato a ser seleccionado debe ser similar al de la Figura N° 6.



Figura N° 6
IDEOTIPO DE INDIVIDUOS DE COPA SIMÉTRICA Y BALANCEADA COMO INDICADOR
DE MADERA SANA, SIN TENSIONES INTERNAS DE CRECIMIENTO

- **Hojas Sanas**

Las lesiones y deformaciones en hojas, que llevan a una disminución de la fotosíntesis, debilitan al árbol, merman el incremento volumétrico anual y además lo dejan vulnerable al ataque de insectos como *Phoracantha spp.* Los principales hongos defoliadores del eucalipto son:

Cercospora spp.

Hendersonia globosa

Mycosphaerella spp. (=Teratosphaeria spp.)

Harknessia spp.

Las evidencias de mancha foliar por sí solas no son señal de daño en la madera, para ello deben ir acompañado de daños también en la corteza.

Madera Homogénea. Sin Pudriciones, Bolsas de Resina, Nudos

Este aspecto es relevante, por cuanto si bien no es posible ver la madera en un árbol en pie, este es el objetivo a través de todas las variables mencionadas precedentemente.

Como indicación general, la calidad de la madera normalmente es inferior cuando se observan:

Defectos de Color

Quebraduras, Aberturas

Pudrición

Marcas de Insectos

Manchas (azul, gris, café)

La madera sana no solo asegura un buen producto final que satisface al cliente, sino que también otorga ventajas competitivas, al disminuir los costos de producción por tener menos defectos que reparar o eliminar, lo que mejora significativamente los márgenes de ganancia con productos de alto valor y bajo costo de producción.

RESUMEN DEL PROTOTIPO VISUAL IDÓNEO PARA USO INDUSTRIAL

Mediante las siguientes imágenes se entrega una síntesis de los elementos de selección de visual para madera en pie para uso industrial (Figuras N° 7 y 8).

Fuste

Un fuste recto facilita y mejora el proceso y único sin bifurcaciones concentra el volumen en un solo tronco.

El fuste cilíndrico genera mejor aprovechamiento y cálculo de volumen con una forma geométrica definida.

El diámetro a la altura del pecho mínimo (DAP) para proceso es de 30 cm aunque se puede aceptar hasta 20 cm si el fuste es recto y cilíndrico.



Figura N° 7
ELEMENTOS VISUALES DE FUSTE ÚNICO, RECTO, CILINDRICO, VERTICAL, CORTEZA SANA,
LIBRE DE RAMAS, PARA SELECCIÓN DE ÁRBOLES PARA USO INDUSTRIAL

La fibra revirada se reconoce por un crecimiento espiralado del fuste, lo que genera madera de mala calidad.

Un fuste libre de ramas indica madera homogénea, libre de nudos o con nudos firmes. Se debe poner atención a podas mal realizadas, con heridas en el fuste.

Crecimiento vertical indica ausencia de madera de tensión, fustes inclinados la presentan y se la reconoce exteriormente por un fuste de sección ovalada e interiormente por una médula excéntrica. La madera de tensión se puede procesar, pero no es lo deseable.

La corteza sana, sin hongos ni manchas de hongos, sin galerías de insectos o desprendimientos de corteza, sin presencia de Hongo “Oreja de palo”, agujeros o aserrín en la base del árbol, indica buena calidad de madera.

Copa

Una copa simétrica indica madera con menores tensiones de crecimiento.

Una copa reducida es producto de podas y se busca al menos 6 m de fuste libre de ramas para obtener dos trozas de 2,5 m con estas características.

Cualquier indicio de hoja no sana indica un árbol debilitado, si lo hay se debe revisar si hay daños en la corteza que puedan significar daño en la madera.



Figura N° 8
ELEMENTOS VISUALES DE COPA SIMÉTRICA, REDUCIDA A 1/2 O 1/3 DE LA ALTURA
Y HOJAS SANAS PARA SELECCIÓN DE ÁRBOLES PARA USO INDUSTRIAL

CONCLUSIONES

La pauta descrita está orientada a evaluar aquellos árboles aptos para uso industrial, específicamente aserrado y debobinado, y por tanto se requiere tener algunos conocimientos básicos del proceso de fabricación y de las características del producto final para evaluar acertadamente cada individuo seleccionado. En este contexto, se debe integrar lo que corresponde a la transición entre el fin de la fase silvícola y el comienzo de la fase industrial, fundiendo conceptos de ambas. Por lo tanto, antes de aplicar esta pauta en un proceso real de selección en terreno, se debe contar con una capacitación básica del proceso industrial, particularmente si quienes la aplicarán pertenecen al área silvícola o si este tipo de árboles constituye la base de un programa de mejoramiento genético.

La madera es el más alto insumo de una planta industrial. Si su selección no toma en cuenta la eficiencia del proceso la planta no tendrá la rentabilidad deseada. A partir de esta etapa la madera pasa a ser parte de una cadena de valor en la que cada fase agregará valor para el cliente, asegurando la permanencia en el tiempo de la empresa.

REFERENCIAS

- Chies, D. 2005.** Influência do Espaçamento Sobre a Qualidade e Rendimento da Madeira Serrada de *Pinus taeda* L., Universidade Federal do Paraná. Brasil pp. 137 (2005).
- Lima, I. 2005.** Influencia do Desbaste e da Adubação na Qualidade da Madeira para Serrada de *Eucalyptus grandis* Hill. ex Maiden. Tese Doutorado. Universidade de São Paulo. Brasil (2005).
- Savidge, R. 2003.** Tree Growth and Wood Quality. In Wood Quality and its Biological Basis. Eds. J.R. Barnett and G. Jeronimidis. Blackwell/CRC, Oxford and Boca Raton, pp 1–29.



19. IDENTIFICACIÓN DE LAS LIMITANTES DE *Eucalyptus nitens* PARA MADERA SOLIDA

Carlos Büchner A.¹
Jorge Cabrera P.²
Roberto Ipinza C.³

INTRODUCCIÓN

Eucalyptus nitens en Chile se ha consolidado como materia prima para la producción de celulosa, logrando estándares de rendimiento y calidad ampliamente aceptados en el mercado mundial. El año 2010, la exportación de celulosa a base de *E. nitens* superó los mil millones de dólares. La Industria de Astillas de *E. nitens* para exportación está en pleno desarrollo, con una producción creciente que se exporta mayoritariamente a Asia. Esta especie representó el 14% del monto exportado en el año 2003, pasando a un 38% al año 2009 con tendencia futura creciente.

En el ámbito de los tableros, se está utilizando en mayor medida en la confección de tableros OSB y en menor medida para generar láminas para la confección de tableros contrachapados. La madera de esta especie se utiliza también como combustible industrial y domiciliario, siendo un producto que ha colonizado este mercado, debido a las facilidades de accesibilidad al recurso, disponibilidad y bajos precios.

En materia de productos sólidos en maderas, poco a poco se ha avanzado en la generación de protocolos que permitan procesar esta especie con rendimientos costo-eficientes aceptables. Esta industrialización de *Eucalyptus nitens* en Chile y en el mundo para uso sólido no ha sido fácil, debido a las tensiones de crecimiento que presenta la especie. Estas tensiones dificultan su procesamiento para madera aserrada y chapas, lo cual genera aprovechamientos industriales inferiores respecto al procesamiento de otras especies, situación que trae consigo rentabilidades menores, tanto para la Industria como para los productores.

Nuevos estudios dan cuenta del potencial de esta especie para la generación de productos sólidos en madera, donde iniciativas de asociación entre productores e industriales, apoyados por el Estado y el Instituto Forestal (INFOR), han generado valiosa información para procesar esta especie con la finalidad de obtener productos de madera sólida, lo cual a futuro debiera ser una alternativa de producción para las empresas y pymes madereras en Chile.

Este capítulo abordará el destino actual de las plantaciones de *E. nitens* en Chile, sus principales usos y la identificación de las limitantes de *Eucalyptus nitens* para la obtención de madera sólida o de calidad, como un paso previo para abordar el mejoramiento genético de esta especie en el siguiente capítulo de este libro.

1 Ingeniero Forestal. Instituto Forestal Sede Valdivia. carlos.buchner@infor.cl

2 Ingeniero Forestal. Instituto Forestal Sede Valdivia. jcabrera@infor.cl

3 Dr. Ingeniero de Montes. Instituto Forestal Sede Valdivia. roberto.ipinza@infor.cl

PLANTACIONES DE *Eucalyptus nitens* EN CHILE

La tendencia a establecer plantaciones con *E. nitens* ha venido en aumento en los últimos años, explicándose esto principalmente por dos razones. La primera es el muy rápido crecimiento, 3 cm en diámetro por año y 3 m en altura por año, rendimientos medios entre 30 y 45 m³/ha/año, siendo la especie de mayor crecimiento en Chile (Figura N° 1); y la segunda es su capacidad para crecer en diferentes tipos de suelo, presentando elevadas tasas de supervivencia y una alta resistencia a las heladas. Estos factores son los pilares fundamentales del aumento de las tasas de plantación en las regiones del sur de Chile principalmente, donde la especie presenta sus mejores rendimientos en cuanto a crecimiento.



Figura N° 1
PLANTACIÓN DE *E. nitens* DE 2,3 AÑOS, UBICADA EN LA ZONA CENTRO – SUR
SECTOR DE PERQUENCO, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA.

Las altas tasas de crecimiento en volumen de madera han sido uno de los factores claves al momento de elegir esta especie para el establecimiento de plantaciones en el sur de Chile. Al ser una especie de muy rápido crecimiento, presenta la oportunidad de obtener un volumen de madera mayor a una edad de rotación más corta, comparado con los rendimientos y esquemas de manejo de otras especies exóticas utilizadas en Chile. Edades de rotación entre los 14 y 16 años, se usan en la actualidad para obtener madera rolliza destinada al abastecimiento de la industria pulpable y de exportación de astillas, generando al productor ingresos monetarios en un menor horizonte de tiempo. Otras ventajas de la especie están en su adaptabilidad a diferentes condiciones de suelo, su resistencia al frío y los mínimos cuidados post-plantación que requiere.

Destino de las Plantaciones

El principal destino industrial de las plantaciones de *E. nitens* ha sido la obtención de fibra, para el abastecimiento de la industria de celulosa nacional y para el mercado de astillas de exportación, principalmente para suministrarlas a las plantas de celulosa en Japón (Figura N° 2).



Figura N° 2
TROZAS ACOPIADAS PARA SER TRASLADADA A LA PLANTA DE PROCESAMIENTO (IZQ) ASTILLAS
PROVENIENTES DE TROZAS PROCESADAS EN PLANTAS DE ASTILLADO (DER).

Otro producto que se desarrolla en la actualidad con las astillas de *E. nitens*, son los tableros OSB (*Oriented Strand Board*) (Figura N° 3). La empresa Louisiana Pacific Chile consume un alto porcentaje de rollizos de *E. nitens* como materia prima en sus plantas de Panguipulli y Lautaro, para la confección de estos tableros.



Figura N° 3
TABLEROS OSB, ASTILLAS (IZQ)
TABlero OSB YA CONFECCIONADO (DER)

La industria de tableros *Plywood* (contrachapados) en Chile, también ha comenzado a utilizar este recurso como materia prima para la confección de algunos productos, como tableros combi, compuestos de laminas de *Pinus radiata* y *E. nitens*, y tableros 100% nitens (Figura N° 4). En esta área de la industria, la especie presenta importantes ventajas que se derivan de su capacidad para generar trozas de gran diámetro, libres de nudos y adecuada forma, características que resultan fundamentales al momento de clasificar las trozas para la industria del debobinado, tanto por el grado de apariencia como por el estructural. Entre las industrias del sur de Chile que compran rollizos a terceros para debobinar, se encuentra la empresa EAGON Lautaro, que desarrolla tableros combi, mientras que la industria INFODEMA SA, ubicada en la ciudad de Valdivia, compra esta especie para confección de tableros para pedidos especiales y generación de tableros combi.

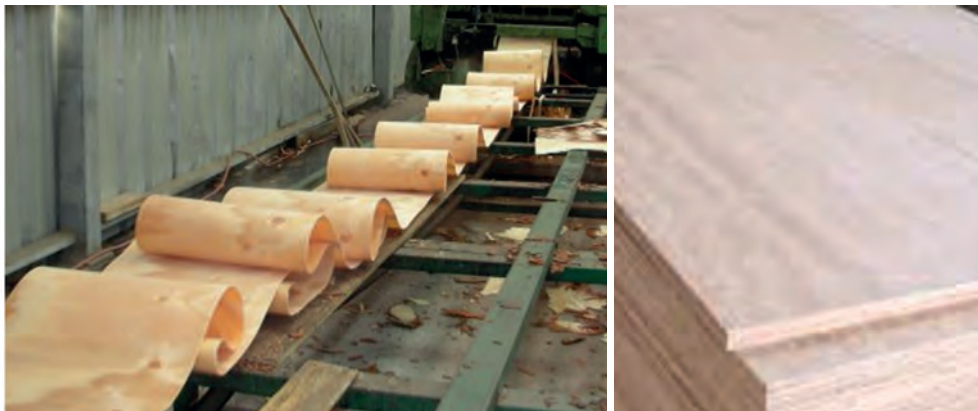


Figura N° 4
DEBOBINADO DE LA TROZA (IZQ) Y TABLEROS CONTRACHAPADOS
USO DECORATIVO O ESTRUCTURAL (DER).

La producción de leña para calefacción domiciliaria es otro de los productos donde *E. nitens* ha aumentado su participación en los últimos años, principalmente en las ciudades del sur de Chile. Esto obedece a la gran disponibilidad del recurso, precios atractivos para vendedores y cercanía de las plantaciones respecto a los centros de consumo, variables que han sido fundamentales en el posicionamiento de la materia prima en este tipo de mercado.

En cuanto a la generación de productos en madera sólida, hoy en día a nivel nacional se procesan pequeños volúmenes, principalmente en empresas y pymes del sur de Chile. En algunos casos, a partir del proceso de debobinado se elaboran tableros 100% *hardwood* o tableros combi, para satisfacer pedidos especiales. En cuanto a la madera aserrada, se comercializan pequeños volúmenes principalmente para la industria del mueble y de pisos.

Opciones de Alto Valor

Desde hace algunos años, un porcentaje de las plantaciones de *E. nitens* es manejado con el objetivo de mejorar la cadena de valor y desarrollar productos en madera sólida, buscando generar trozas libres de nudos (madera *clear*) para el mercado de la apariencia, y aprovechando los excelentes crecimientos que presenta la especie, capaz de generar árboles de grandes diámetros, a edades de rotación más cortas que las requeridas por pino radiata.

La estrategia de manejo de alto valor, adoptada por las pymes forestales del sur de Chile, y algunas grandes empresas, busca a diferencia del manejo pulpable poder desarrollar un árbol multipropósito, capaz de generar una variedad de rollizos de un mismo árbol para abastecer a distintas áreas de la industria forestal Chilena. Se estima que actualmente en el país hay alrededor de 18.000⁴ hectáreas de plantaciones de *E. nitens* que presentan algún grado de manejo con fines de alto valor.

Este tipo de manejo, que tiene por objetivo generar madera rolliza con alta proporción de madera libre de nudos y defectos, permite obtener productos con grandes ventajas estéticas

⁴ Cifra estimada por INFOR.

y estructurales. Las investigaciones realizadas por INFOR, en el área de la silvicultura, dan cuenta de la excelente respuesta a podas y raleos que presenta la especie. Por ejemplo, un ensayo de raleo establecido el año 2005, en una plantación del año 2002 en la región de Los Ríos, donde se probó dos tipos de raleo (T1 y T2) y un testigo sin intervenir (T0) (Cuadro N° 1), permitió concluir después de 4 años de mediciones que el efecto del raleo sobre el promedio del DAP se hace evidente 2 años después de la intervención, y que la diferencia de las parcelas raleadas respecto al testigo se acrecienta en los años posteriores. Sin embargo, en todos los tratamientos las tasas de crecimiento anual en diámetro fueron decrecientes, antes de la marcación del segundo raleo, reflejando que las densidades residuales del primer raleo, en ambos tratamientos (T1:780 y T2:980), fueron muy elevadas, lo que incentivó prontamente la competencia intra-específica (Figura N° 5).

Cuadro N° 1
DENSIDAD EN TESTIGO Y TRATAMIENTOS DE RALEO

	T0	T1	T2
	(Arb/ha)		
Densidad inicial	1.667	1.667	1.667
Densidad 3,5 años	1.667	780	980
Densidad 9 años	1.667	180	180

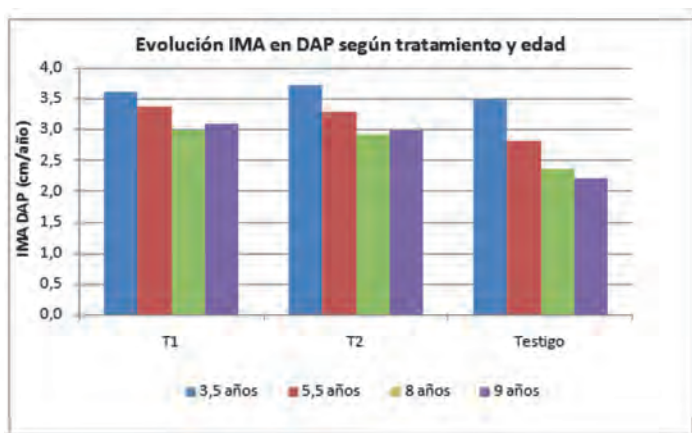


Figura N° 5
EVOLUCIÓN DEL IMA (Incremento Medio Anual) EN DAP, SEGÚN EL TRATAMIENTO Y EDAD DE MEDICIÓN.

Estos manejos intensivos en busca de productos de mayor valor, implican desarrollar rotaciones promedios de entre 15 a 18 años, con el objetivo de obtener desde un mismo árbol trozas debobinables, aserrables y pulpables.

Industrialización como Madera Solida

Aún cuando la especie presenta dificultades para la generación de productos en madera sólida, se ha demostrado la factibilidad de procesarla industrialmente para generar productos de alto valor.

En el área de los ciclos del proceso, la dificultad se presenta al momento de obtener los productos en madera sólida, debido a las tensiones de crecimiento que presenta la especie y que son propias del género *Eucalyptus*. Algunas experiencias exitosas a nivel piloto, han demostrado el potencial de esta especie en la obtención de productos de madera sólida.

Para obtener madera sólida es necesario conocer características de la especie que pueden actuar como limitantes de este proceso. En *E. nitens* las limitantes se presentan desde la cosecha del árbol hasta el secado de la madera, donde las tensiones de crecimiento se manifiestan como el principal obstáculo que limita la obtención de madera sólida.

Actualmente se ha establecido que en el ciclo de aserrío se requiere utilizar determinadas estrategias de corte, dependiendo de los equipos utilizados, que aumentan los tiempos de procesamiento. Lo mismo ocurre en la etapa de secado de la madera aserrada, proceso que debe ser aplicado en forma lenta, con bajos gradientes de pérdida de humedad, lo que también se traduce en un mayor tiempo de procesamiento con respecto al requerido por pino radiata, que es la principal materia prima que utilizan actualmente los aserraderos del país.

En materia de investigación e innovación, gradualmente se ha desarrollado mayor conocimiento en los últimos años, permitiendo que a nivel industrial y de algunas pymes madereras del sur, se estén realizando cada vez más pruebas en esta especie, obteniéndose excelentes resultados en sus líneas de procesos. En el área industrial, las investigaciones y pruebas realizadas en el último tiempo, han alcanzado un alto grado de eficiencia, tanto en el proceso de obtención de madera aserrada como en el de secado, y se ha desarrollado prototipos de productos en madera sólida, con excelentes resultados, faltando en algunos casos su comercialización en el mercado nacional con algún producto específico.

En las empresas de menor tamaño, como las pymes madereras, las investigaciones y ensayos realizados también han presentando buenos resultados en el área de proceso (aserrío), sin embargo en la etapa del secado, al no disponer de equipos, el proceso es más lento (meses de secado al aire), por lo que las pymes deben estar dispuestas a asumir el costo adicional que representa elaborar un producto que recién estará disponible para comercializarse en la siguiente temporada. En este sector se reconoce como una oportunidad para los productores e industriales desarrollar asociatividad, innovación y diversificación de la producción (Figura N° 6).



Troza en proceso de aserrío proveniente de un quinto raleo realizado a los 9 años, con diámetros menores promedios entre 22 a 25 cm y diámetro del cilindro defectuoso (DCD) promedio entre 16 a 18 cm, empresa SAFFCO SA, Comuna de Paillaco (izq.). Madera aserrada empresa MADEXPO, Comuna de Osorno (der).

Figura N° 6
PRODUCTOS DE MADERA SÓLIDA DE *Eucalyptus nitens*

INFOR, en conjunto con la Universidad Austral de Chile, ha generado valiosa información sobre los procesos básicos para la transformación y elaboración de productos en madera sólida de *E. nitens*. Los resultados de estos estudios generados a través de proyectos tales como “Desarrollo de Opciones Productivas de Mayor Valor para Plantaciones de *Eucalyptus nitens* en Chile”, financiado por el fondo FDI/CORFO a comienzos del 2000 y el “Programa de Innovación Territorial” (Pit nitens), 2009 – 2011, financiado por FIA, entregan información sobre la factibilidad de procesar la especie con resultados aceptables en cuanto a rendimiento, pero a la vez identifican la necesidad de adoptar procedimientos que en primera instancia presentan productividades inferiores a los obtenidos con otras especies, como pino radiata.

LIMITANTES EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE MADERA SÓLIDA

La especie presenta una gran variabilidad en algunas de las características y propiedades de la madera pertinentes para uso sólido, como por ejemplo, la densidad básica, tanto en el sentido axial como radial; altos nivel de contracción y colapso; y las tensiones de crecimiento. Esta última característica es uno de los problemas más importantes que enfrentan los productores de madera sólida, por cuanto es una de las principales causas del bajo aprovechamiento industrial de las trozas para este uso. Al respecto, el mejoramiento genético es un enfoque de utilidad para resolver este problema. Algunos autores como Kube y Raymond (2002), Touza (2001) y Valencia *et al.* (2011) entre otros, agregan que las rajaduras de puntas de las trozas y el colapso, son unas de las principales causas de la desclasificación de madera en esta especie.

En el proceso de obtención de madera sólida se identifican algunas variables en las etapas de generación y transformación de madera, que van desde la cosecha hasta el secado, y que se consideran de importancia en la obtención de productos de madera sólida (Figura N° 7).

Cosecha	- Tensiones de Crecimiento. - Heterogeneidad del contenido de humedad en la troza. - Pérdida de humedad.
Aserrio	- Tensiones de Crecimiento. - Densidad. - Nudos. - Grano en espiral.
Debobinado	- Tensiones de Crecimiento. - Excentricidad de la medula. - Densidad de la madera. - Heterogeneidad del contenido de humedad en la troza. - Grano en espiral. - Nudos, bolsas de resina.
Secado	- Tensiones de Crecimiento (alabeos, grietas y rajaduras). - Heterogeneidad del contenido de humedad en la troza. - Contracción y colapso. - Densidad.

Figura N° 7
VARIABLES PARA LA PRODUCCIÓN DE MADERA DE CALIDAD
PARA USOS SÓLIDOS DE ALTO VALOR EN *Eucalyptus nitens*

Un aspecto relevante en relación a las cuatro etapas identificadas en la Figura N° 7 (Cosecha, Aserrío, Debobinado y Secado) es que en todas ellas se encuentra presente la variable Tensiones de Crecimiento, que limita de una u otra manera el aprovechamiento industrial de esta especie para uso como madera sólida.

Cosecha

Al momento del volteo de los árboles y posterior dimensionado de las trozas, productor y comprador se ven enfrentados a una primera barrera de segregación de rollizos con el objetivo de clasificar qué trozas serán destinadas para determinados usos finales, dependiendo de los esquemas o programas de trozado. Durante esta clasificación, además de variables como curvatura, sanidad, largos nominales, nudos, hendiduras, pudriciones, entre otras, se debe considerar también la manifestación de las tensiones de crecimiento en el árbol, que se expresan en forma de grietas en los extremos de las trozas. La magnitud que presente la grieta en la cara de la troza al momento de ser clasificada dependerá del nivel de tensión que tenga el árbol al momento de ser cosechado. Las grietas pueden ser de grado menor, profundas o grietas abiertas en los extremos de las trozas (Figura N° 8), y constituyen un factor de desclasificación de la madera para la industria de las chapas, debido a que dificultan su procesamiento en el debobinado, secado y producto final. Estas trozas agrietadas pueden ser útiles para producir madera aserrada, sin embargo se tendrá que tener en consideración el sentido y nivel de la grieta para su aprovechamiento.



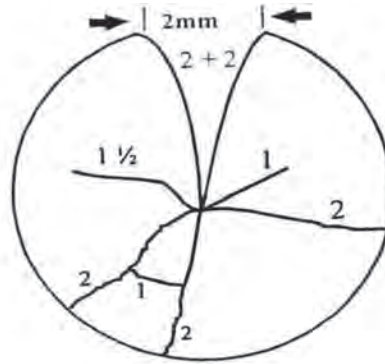
Troza recién cosechada, que presenta una rajadura de nivel incipiente (izq.)

Troza con rajaduras intermedias, durante el proceso de aserrío (centro)

Troza con rajaduras abiertas estrelladas y cruzadas, evaluada después del proceso de macerado, en la industria del debobinado (der).

Figura N° 8
GRADOS DE GRIETAS EN TROZAS

Una forma de medir el nivel de rajaduras que presentan las trozas de *E. nitens*, las que se comienzan a manifestar inmediatamente después del volteo, es utilizando el índice CSIR. Este índice asigna un puntaje en función del número de grietas, sus características y relación con el diámetro de la troza (Figura N° 9).



1 punto por grietas radiales de medio radio de longitud; 1 punto por milímetro si la grieta se extiende en la periferia de la troza, 1 punto por medio radio de longitud para grietas tangenciales.
El ejemplo presenta un Índice CSIR de 13,5.

Figura N° 9
EJEMPLO DE EVALUACIÓN DEL GRADO DE LAS RAJADURAS
EN LAS TROZAS A TRAVÉS DEL ÍNDICE CSIR

En un ensayo se analizó el comportamiento de las grietas en tres etapas del procesamiento de la madera; (i) inmediatamente después del volteo, (ii) etapa posterior al transporte y descarga, y (iii) etapa previa al aserrío (Figura N° 10). Se observó un aumento considerable del nivel de las grietas en la etapa que comprende desde el madereo de las trozas, carga de las trozas para su transporte, transporte y descarga de las trozas en canchas de acopio en las plantas de proceso. Este aumento se atribuye a la excesiva manipulación y poco cuidados de las trozas en esta sección del ciclo de cosecha y transporte, lo que las desclasifica o disminuye sus rendimientos finales en los productos a obtener.

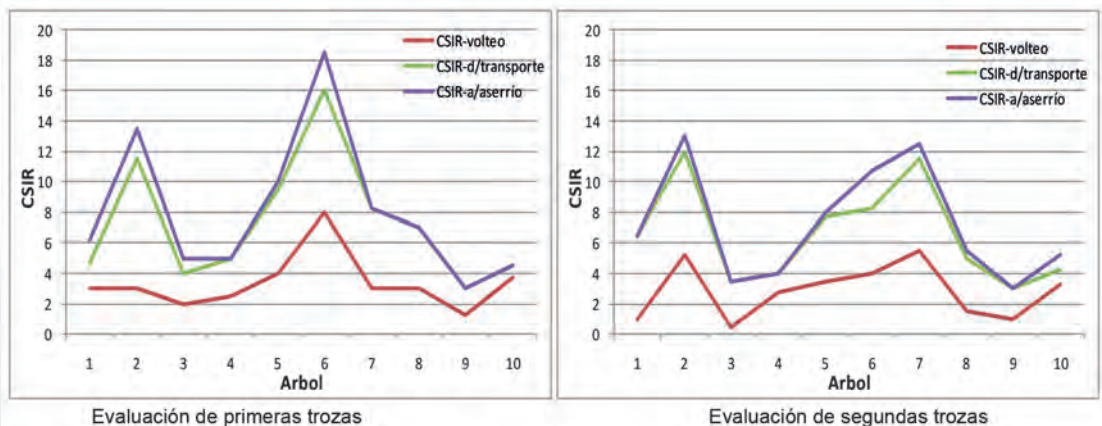


Figura N° 10
EVOLUCIÓN DEL CSIR EN TROZAS EVALUADAS DESPUÉS DEL VOLTEO, DESPUÉS DEL TRANSPORTE Y
PREVIO AL PROCESO DE ASERRÍO.

La cosecha es una etapa de gran importancia para los productores de trozas, debido a que el producto esperado, trozas de alto valor, podría ser descalificado para producción de madera sólida debido principalmente al grado de tensión que pudiera manifestar el árbol al momento de su volteo y en las etapas posteriores, disminuyendo así la rentabilidad esperada de la operación.

Aserrío y Debobinado

Las rajaduras en los extremos de las trozas en *E. nitens* constituyen una limitante importante para la obtención de madera sólida, principalmente para la producción de chapas de alta calidad y madera aserrada (Figura N° 11). El proceso de selección de las trozas es sumamente importante. Además de las características comunes de clasificación, como rectitud, ahusamiento, sanidad, entre otras, se debe sumar el nivel de tensión que presenta la troza, expresado en las rajaduras terminales que presente después del volteo, ya que estas tienden a seguir aumentando en las etapas posteriores del proceso.



Figura N° 11
RAJADURAS EN LOS EXTREMOS DE LAS CHAPAS DE *Eucalyptus nitens*
PRODUCTO DE LAS TENSIONES DE CRECIMIENTO

En la industria del debobinado, las trozas que presentan grandes rajaduras no se consideran adecuadas para el proceso debido a que afectan el rendimiento de producción, además de generar chapas con rajaduras en los extremos que disminuyen la calidad de estas. Se debe sumar también, en la mayoría de los casos, una etapa previa al debobinado que corresponde al macerado de las trozas (calentamiento de las trozas en piscinas con agua caliente), que facilita la entrada del cuchillo del torno en ella para la obtención de las chapas. Este proceso, es sumamente importante, ya que la maceración de las trozas en *E. nitens* tiende a facilitar la manifestación de las tensiones de crecimiento, aumentando el nivel de las rajaduras en los extremos de las trozas, desclasificándolas en algunos casos para su procesamiento en el torno de debobinado. Protocolos de maceración que consideren 12 a 18 horas subiendo y bajando la temperatura del agua en forma lenta, con máximos entre 60° a 65°C, han dado buenos resultados. Este procedimiento requiere de una etapa previa de segregación de las trozas antes del macerado, en la cual aquellas que presentan niveles de rajaduras incipientes en sus extremos se consideran adecuadas para continuar el proceso de producción de chapas.

En el área de aserrío, las tensiones de crecimiento disminuyen el rendimiento del proceso. Para procesar trozas que presentan rajaduras en los extremos, se deben orientar los cortes de aserrío en función de las rajaduras existentes, lo que limita las posibilidades de productos finales a obtener en madera aserrada. Sin embargo, aún presentando esta limitante, es posible el aprovechamiento de las trozas con niveles de tensiones medios y altos.

De acuerdo con los modelos de distribución de tensiones descritos por Touza (2001), se puede procesar trozas de *E. nitens* sin mayores complicaciones. Estos modelos demuestran la factibilidad de aserrar con resultados aceptables, pero requieren que se adopten procedimientos que en primera instancia se observan poco productivos. En efecto, el proceso de aserrío es más lento, ya que los cortes deben ser aplicados con la finalidad de disminuir los niveles de tensión presentes en la troza.

Las tensiones de crecimiento también se traducen en otros defectos durante el aserrío, por ejemplo en alabeos. Al aserrar se pueden efectuar cortes radiales o tangenciales. Utilizando estrategias de corte radial, la madera aserrada tendrá una mayor incidencia y severidad de encorvadura, la cual no es factible de controlar, salvo disminuyendo el largo de las piezas finales. Con la estrategia de corte tangencial, la madera aserrada tendrá una mayor tendencia a sufrir grietas superficiales y arqueaduras. Estas arqueaduras son factibles de controlar durante el proceso de secado, aplicando peso sobre los paquetes de madera (Figura N° 12).



Figura N° 12

TABLA CON RAJADURA QUE LIMITA EL PRODUCTO FINAL A OBTENER (IZQ). TABLA DE CORTE TANGENCIAL CON ARQUEADURA POSIBLE DE CORREGIR AGREGANDO PESO DURANTE EL PROCESO DE SECADO (CENTRO). TABLAS DE CORTE RADIAL CON ENCORVADURAS QUE LIMITAN EL LARGO DE LOS PRODUCTOS FINALES A OBTENER (DER).

Secado

El secado de la madera de *E. nitens* es complejo. En la operación industrial se realiza un pre-secado al aire por 2 a 3 meses, dependiendo de las condiciones atmosféricas de la zona; luego un pre-secado en cámara; posteriormente un reacondicionado a la madera; y luego el secado final en cámara. Esta complejidad del proceso de secado limita las posibilidades de las pymes para procesar esta especie y obtener productos en madera sólida.

El secado de *E. nitens* se caracteriza por una rápida pérdida del agua contenida en la superficie de la madera, lo que genera altos gradientes de humedad, contracción superficial y tensiones de secado, que a su vez originan grietas superficiales e internas que descalifican el producto para determinados usos.

Los elevados niveles de colapso que presenta la madera son más severos en el sentido tangencial que en el radial. Este colapso se puede revertir mediante reacondicionado de la madera en cámaras de secado. La información disponible indica valores de colapso de 3 a 5% para tablas de corte tangencial y de 1 a 3% para tablas de corte radial. *E. nitens* también

presenta elevados niveles de contracción, los que son mayores en el sentido tangencial que radial. Estas contracciones deben ser consideradas al momento de dimensionar las escuadrías de la madera en verde, no siendo consideradas como una limitante.

La densidad básica de la madera en *E. nitens* presenta variaciones en el sentido radial y axial. En el sentido radial, la densidad aumenta desde la médula hacia la periferia del fuste y en el sentido axial, aumenta desde la base al ápice. Estudios realizados en Australia han demostrado, aumentos del orden de 80 Kg/m³ desde zonas cercanas a la medula a zonas cercanas a la periferia y de 20 a 25 Kg/m³ más, para madera ubicada en la segunda troza, respecto a la troza basal (Valencia, 2010).

Tales variaciones de densidad influyen en el comportamiento de la madera y en sus propiedades físico-mecánicas. Los mismos estudios han demostrado que el colapso y la contracción siguen un patrón similar al de la densidad básica cuando se evalúan en el sentido radial, pero esta relación se invierte en el sentido axial, siendo menores los valores de colapso y contracción a mayor altura. Estas características que presenta la madera en *E. nitens*, pueden ser consideradas como variables limitantes por cuanto afectan el proceso y rendimiento para producción de madera sólida. Sin embargo, al efectuar una clasificación de la madera por sección (tablas laterales, centrales) y aplicando protocolos de secado de gradientes bajos y adecuados para la especie, y controlando en forma constante este proceso, es posible obtener buenos resultados con piezas finales de considerable calidad.

CONCLUSIONES

E. nitens, es una especie relativamente nueva en el país, que en poco tiempo ha colonizado a la industria de celulosa nacional y de exportación de astillas para mercados asiáticos. Ha resultado ser la especie con los mayores crecimientos en Chile, presentando una gran resistencia a las heladas y una gran capacidad para crecer en diferentes condiciones de suelos, factores que han sido muy atractivos a la hora de decidir qué especie establecer, tanto por las empresas forestales, las Pymes Forestales y los pequeños y medianos propietarios.

En cuanto a su utilización, se ha comenzado un lento proceso para diversificar sus usos como materia prima. Industrias de tableros OSB principalmente y, en menor medida, industrias de generación de chapas han comenzado a integrar a esta especie como materia prima para sus líneas de producción.

En la industria del aserrío, algunas experiencias en forma aislada han generado prototipos de productos como pisos y madera para el mercado de apariencia principalmente. Sin embargo, aún falta un mayor conocimiento y dominio de las técnicas de corte, tipos de maquinaria a utilizar, técnicas de secado y segregación de trozas, etapas relevantes para la obtención de productos en madera sólida.

Conocer las limitantes que presenta la especie para la obtención de productos en madera sólida es imprescindible para desarrollar estrategias que permitan superar esas limitaciones.

Las rajaduras en los extremos de las trozas, producidas por la manifestación de las tensiones de crecimiento, deben ser consideradas como una variable de segregación de la madera rolliza en *E. nitens*. A las variables tradicionales de segregación de rollizos se puede

agregar la utilización del índice CSIR, a través del cual se puede generar una pauta de segregación con valores de manifestación de las rajaduras, evaluando la variable en alguna etapa del ciclo que se genera entre el volteo de los árboles y la llegada de las trozas a la planta industrial. A modo de ejemplo, trozas que presenten CSIR entre 4 a 4,5 pueden ser apropiadas para la industria del debobinado o foliado, en la medida que cumplan los otros requisitos de diámetros, sanidad, curvaturas y otros que les sean exigibles para ese fin. Trozas con un índice CSIR de máximo 10, pueden ser destinadas a la industria del aserrío.

Esta medida de segregación basada en el índice CSIR, aún debe ser estudiada y evaluada para definir los rangos óptimos, antes de usarse como una herramienta de apoyo para las pymes e industria maderera.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al grupo PRONitens AG, que con su apoyo e inquietudes permitió generar en INFOR una línea de trabajo e investigación en torno al *E. nitens*. También agradecen el apoyo de la Empresa INFODEMA SA, que a través de su Programa de Desarrollo de Proveedores de *E. nitens* ha generado y transferido valiosa información. Extienden su gratitud a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile, por su apoyo a INFOR en actividades de investigación y transferencia efectuadas en forma conjunta en torno al *E. nitens*.

REFERENCIAS

Kube, P. Raymond, C. 2002. Breeding to minimize the effects of collapse in *Eucalyptus nitens*. Technical Report 93. Project A5: Wood quality. CRC 19 p.

Touza, M. 2001. Tensiones de crecimiento en *Eucalyptus globulus* de Galicia (España): influencia de la silvicultura y estrategia de aserrado. Maderas, Ciencia y Tecnología 3, 68-89.

Valencia, J. 2010. Paquete de Tecnologías para producción de trozas de alto valor con *E. nitens*. Informe final año 1, Actividad B3 PDP de INFODEMA S.A. Instituto Forestal (INFOR), Valdivia.

Valencia, JC.; Harwood, C.; Washusen, R.; Morrow, A.; Wood, M. and Volker, P. 2011. Longitudinal growth strain as a log and wood quality predictor for plantation-grown *Eucalyptus nitens* sawlogs. Wood Science and Technology 45:15-34.





20. BASES CONCEPTUALES PARA ESTABLECER UN PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DE *Eucalyptus nitens* PARA USO SÓLIDO

Roberto Ipinza C.¹
Maria Paz Molina B.²
Braulio Gutiérrez C.³
Oriana Ortiz N.⁴

INTRODUCCIÓN

Eucalyptus nitens, la tercera especie forestal de importancia comercial en Chile (Trincado y Lasserre, 2005), posee la mayor tasa de crecimiento registrada en el país y una de las mayores del mundo (hasta 77 m³/ha/año) (Barros y Rojas, 1989), y una gran tolerancia a bajas temperaturas (Prado y Barros, 1989), situación que permite incorporar a la producción una superficie estimada de más un millón de hectáreas de terrenos donde no es posible otro desarrollo forestal intensivo (INFOR, 2006).

En la actualidad se la utiliza como materia prima para la producción de celulosa, pero debido a su rápido crecimiento, buena forma y excelente respuesta a raleos y podas, ha surgido interés por obtener productos distintos y de mayor valor agregado, como madera aserrada y chapas, que constituyen una atractiva opción para medianos y pequeños productores forestales, en la zona templada fría del sur de Chile. En efecto, con una silvicultura apropiada, la especie tiene un gran potencial para producir, en turnos relativamente cortos (18 años), rollizos gruesos (60 cm de diámetro), con alta proporción de madera libre de nudos y de defectos para chapa o aserrío, conjuntamente con rollizos aserrables con nudo, productos que cada día concentran mayor interés entre los productores e inversionistas forestales (Valencia y Cabrera, 2006) y que a su vez presentan excelentes oportunidades de mercado en Chile y el extranjero.

A pesar de estas ventajas de crecimiento y forma, las investigaciones implementadas a la fecha (PIT5 Nitens en Chile, CRC6 de Australia y CSIR7 de Sudáfrica), han identificado limitaciones importantes en *E. nitens*, básicamente referidas a calidad de su madera, que restringe el aprovechamiento industrial en la producción de madera sólida. Efectivamente, el principal problema que impide consolidar el negocio forestal con *E. nitens* en este segmento, son las tensiones de crecimiento presentes en su madera, las cuales producen defectos que reducen el aprovechamiento industrial de sus trozas en los procesos de conversión a madera aserrada y chapas. Se estima que en una plantación con objetivo pulpable, aproximadamente

1 Ingeniero Forestal, Doctor Ingeniero de Montes. Instituto Forestal, Sede Valdivia. roberto.ipinza@infor.cl

2 Ingeniero Forestal. Mg Cs. Instituto Forestal, Sede Bio Bio. mmolina@infor.cl

3 Ingeniero Forestal. Instituto Forestal, Sede Bio Bio. bgutierr@infor.cl

4 Ingeniero Forestal. oriana1.ortiz@gmail.com

5 PIT = Programa Integrado Territorial, financiado por el FIA (Fundación para la Innovación Agraria) de la asociación gremial PRONitens AG.

6 CRC = Cooperative Research Center

7 CSIR = Council for Scientific and Industrial Research.

el 15% de las trozas tienen aptitud para uso sólido⁸. Por otra parte, programas de mejoramiento genético para características tecnológicas de la madera de *E. nitens*, como el iniciado por INFOR, con financiamiento de FIA⁹ (PIT Nitens), la participación del Dr. Nuno Borraho un destacado asesor portugués¹⁰ y la colaboración de Forestal Mininco SA, han concluido que las posibilidades de mejorar la calidad de la madera por la vía genética en la especie pura es limitada y que las eventuales ganancias que se obtengan serán difíciles de masificar, debido a que la especie presenta una muy restringida capacidad rizogénica que impide su clonación operacional, no obstante lo anterior, el mejoramiento de la especie pura continúa siendo una condición deseable, y a la vez necesaria para mejorar la eficiencia de la hibridación interespecífica, tecnología esta última, que constituye el siguiente paso lógico para aprovechar el potencial de la especie. Consecuentemente, en el presente capítulo se concentra el énfasis en el mejoramiento genético de la especie pura.

HITOS EN EL DESARROLLO INDUSTRIAL DE *E. nitens*, CON ÉNFASIS EN CHILE

Existe investigación respecto a *E. nitens* desde 1967, cuando INFOR introdujo la especie al país, la que se continuó posteriormente con evaluaciones del comportamiento de distintas procedencias y progenies de la especie en Chile, y programas de mejoramiento genético emprendidos por empresas privadas. Todos focalizados hacia la producción de pulpa. Desde ese entonces, y particularmente en los últimos años, se han producido algunos hitos relevantes que se relacionan con el aprovechamiento industrial de la especie. Entre ellos se distinguen los siguientes:

- En los últimos años se ha consolidado la creación de un grupo organizado de trabajo que convoca a numerosos productores e industriales de las Regiones de Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos (PRONitens AG), el cual se ha concentrado en desarrollar esquemas de manejo para madera sólida (aserrable y debobinable) y en la prospección de mercados para estos productos en el extranjero. Este grupo ha instalado el primer aserradero y secador destinado a madera sólida de *E. nitens*, la empresa MADEXPO, empresa productora de pino, se ha propuesto alcanzar un 50% de su producción a base de *E. nitens* y además se cuenta con el compromiso de INFODEMA para incrementar la producción de chapas de esta especie.
- Existe interés de Forestal Mininco SA por ampliar la utilización de *E. nitens*, proyectando tasas crecientes de plantación con esta especie y por explorar la producción de madera sólida y material debobinado como una forma de aprovechar económicamente su potencial de crecimiento en sitios templados fríos de las Regiones de Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos, para integrar a la producción superficies importante de su patrimonio que hoy en día no son productivas debido a restricciones de temperatura.
- En Australia, Blackburn *et al.* (2009) demuestran que en *E. nitens* existe una base genética con importante variación a nivel familiar, dentro de las procedencias, para mejorar mediante selección genética el grado de apariencia y el grado estructural de la madera aserrada.

8 Antonio Minte, Director Ejecutivo PRO Nitens AG. Comunicación personal 2011

9 FIA = Fundación para la Innovación Agraria, Ministerio de Agricultura Chile.

10 Dr. Nuno Borralho, asesor del Instituto Forestal. Junio 2011

- La experiencia de Brasil por más de 30 años de clonar híbridos interespecíficos ha sido, en conjunto con la evolución de la silvicultura, el hilo conductor del aumento de la productividad de los bosques de ese país (Assis, 2011). Actualmente, dentro de las 4,7 millones de hectáreas plantadas con *Eucalyptus* en Brasil, alrededor de un millón de hectáreas son plantadas con 362 clones, principalmente interespecíficos (*Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* = “urograndis”) o especies puras que son establecidas en áreas que van desde 10 a 34.000 hectáreas/clon/empresa (Alfenas et al., 2011).
- El actual desarrollo de las técnicas de hibridación (polinización controlada), como la llamada AIP (*Artificially Induced Protogyny*), técnica que permite mejorar la productividad operacional de 35 a 400 flores polinizadas/persona/hora y ofrece la posibilidad, previo ajuste metodológico a *E. nitens*, de aplicar una tecnología consolidada para combinar características deseables de distintas especies y de esta forma obtener progenies híbridas que permitan sobrellevar las limitaciones que exhibe *E. nitens* como especie pura, tanto en tensiones de crecimiento de la madera como en la tasa de enraizamiento operacional.
- Existe un importante número de especies de *Eucalyptus* taxonómicamente cercanas, como *E. smithii*, *E. benthamii*, *E. dunnii*, *E. globulus ssp bicostata* (tolerantes al frío); *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. cladocalyx*, *E. longirostrata*, y *E. brassiana* (tolerantes a la sequía); *E. pellita* (resistente a enfermedades), *E. grandis*, *E. urophylla*; así como híbridos F1 e híbridos avanzados¹¹, entre otros, que se caracterizan por presentar atributos de interés comercial, tales como tolerancia a sequía, mayor contenido de lignina, menor incidencia de tensiones de crecimiento, apropiada capacidad de enraizamiento, entre otras, que pueden mejorar el desempeño de *E. nitens* y que son compatibles con éste para efectuar hibridación.

TERMINOLOGÍA Y DEFINICIONES

El problema para la obtención de productos sólidos de madera desde las especies del género *Eucalyptus*, y en particular desde *E. nitens*, se puede cuantificar en función del parámetro “rendimiento de aserrío”, el que normalmente determina que para una troza de volumen conocido, la presencia de defectos baja su rendimiento en la obtención de productos finales. Tales defectos se pueden agrupar en dos tipos principales; (i) los asociados a la formación de rajaduras longitudinales y torsiones, cuya causa se debe en mayor medida a la presencia de tensiones de crecimiento en la madera y (ii) los asociados a aspectos de estabilidad dimensional (contracciones, colapso interno y grietas), causados en su mayoría por diferencias en la velocidad de secado (i.e. diferencias de humedad en la madera), en general aparecidas cuando el proceso de secado es demasiado rápido. Los dos problemas (colapso+grietas y tensiones+torsiones) se relacionan con distintas características de la madera, pero ambos contribuyen a que la tasa de aprovechamiento sea menor.

Para el uso del *E. nitens*, en Chile se ha considerado que las rajaduras causadas por tensiones de crecimiento son el factor clave a mejorar. Desafortunadamente son características muy difíciles de evaluar a gran escala. Las rajaduras, sin embargo, presentan una fuerte asociación con la presencia de leño de tensión, que a su vez corresponde a una madera de elevado contenido de celulosa o de bajo contenido de lignina. En las poblaciones

¹¹ =Híbridos complejos, cruza entre híbridos o de híbridos con otras especies puras

de mejoramiento, la evaluación extensiva de la composición química de la madera es mucho más fácil de implementar. Consecuentemente, esa será la filosofía de selección genética destinada a reducir las tensiones de crecimiento de *E. nitens* para madera sólida.

El fenómeno de colapso y grietas es algo determinado por la densidad de la madera y casi independiente de las tensiones de crecimiento (Chauhan y Walker, 2004). A diferencia de las rajaduras, que son irreversibles, las contracciones y los cambios dimensionales en la madera se pueden recuperar en gran medida mediante adecuados regímenes de secado, ciclos de secado y humidificación, temas sobre los cuales existen trabajos ya desarrollados, por ejemplo Blakemore *et al.* (2010).

En Australia la mayoría de las investigaciones se refieren solamente a los problemas de colapso y de grietas y muy pocas al de las tensiones, esto debido a que en Australia las rajaduras tienen menor relevancia (Blakemore and Northway, 2009).

EL ÁRBOL DEL PROBLEMA

La causa principal del bajo aprovechamiento industrial de las trozas de *E. nitens* es la severa acumulación de tensiones de crecimiento en su madera. Estas tensiones son un fenómeno normal en especies del género *Eucalyptus*, como *Eucalyptus grandis*, pero son particularmente altas en *E. nitens*. Ellas se originan durante la maduración de las células producidas en el cambium, las cuales tienden a expandirse lateralmente y a contraerse longitudinalmente, lo que al ser impedido por las células formadas en años anteriores genera un conjunto de esfuerzos de tracción y compresión, que una vez volteado el árbol se manifiestan como una serie de defectos que disminuyen el rendimiento de su conversión industrial (Touza, 2001). Los principales defectos atribuidos a estas tensiones de crecimiento corresponden a rajaduras de las trozas; a la manifestación de grietas, rajaduras y alabeos (torceduras, encorvaduras, arqueaduras) en piezas aserradas; y a defectos que descalifican la producción de chapas (básicamente rajaduras). Por otra parte, *E. nitens* también es una especie muy propensa al colapso y a la aparición de grietas superficiales e internas en los productos durante el proceso de secado, lo cual limita aún más la recuperación de productos de alto valor.

Otra limitante para mejorar la calidad de la madera de la especie pura, utilizando el mejoramiento genético convencional, es la dificultad de masificación de los individuos deseables, de alto crecimiento y adecuadas propiedades de la madera. Eso impide que los individuos de alto valor sean aprovechados operacionalmente mediante clonación. Existen numerosas líneas de investigación para poder superar este obstáculo, algunos sugieren el desarrollo de híbridos avanzados (Machado de Fonseca *et al.*, 2010) para masificar las ganancias genéticas obtenidas.

A continuación se define las limitantes de *E. nitens* para ser aprovechado como madera sólida, usando la metodología de la Matriz de Marco Lógico. Para este fin se elabora en primer lugar una concatenación de causas y efectos que en su conjunto conforman el denominado árbol del problema (Figura N° 1).

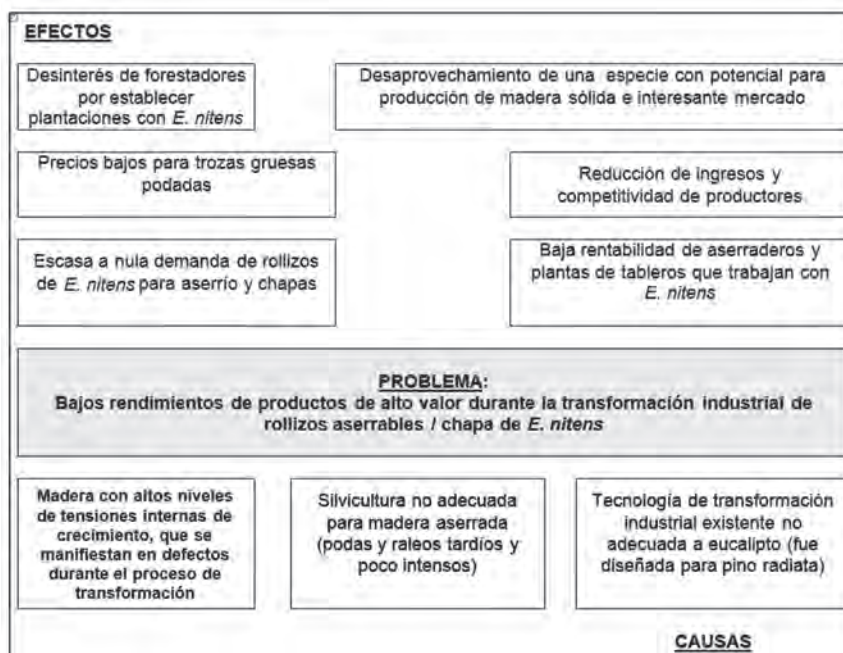


Figura N° 1

CAUSAS Y EFECTOS DEL PROBLEMA BAJO RENDIMIENTO EN PRODUCTOS DE ALTO VALOR DURANTE LA TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL DE *E. nitens*.

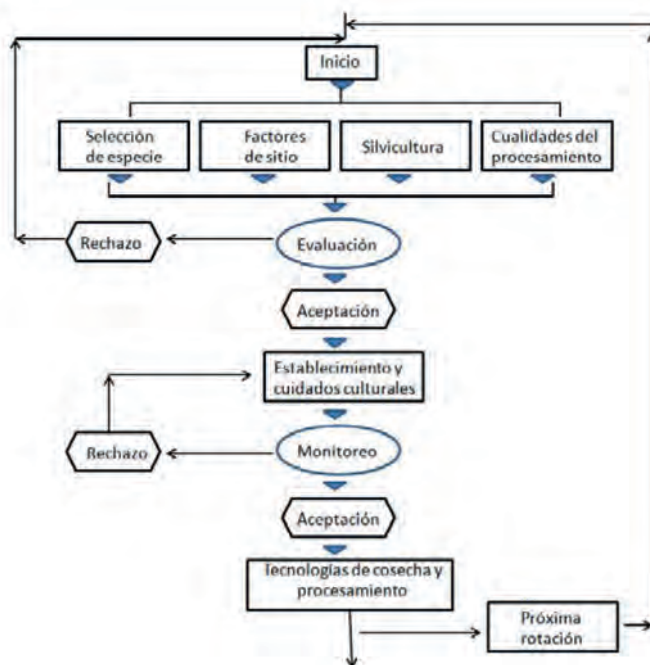
MODELO CONCEPTUAL PARA MEJORAR EL USO DE *E. nitens* EN LA PRODUCCIÓN DE MADERA SÓLIDA

Para establecer una oferta sostenida de productos sólidos y de calidad con *E. nitens*, Chile enfrenta algunos desafíos y limitaciones. El principal de ellos lo constituye el fenómeno de las tensiones de crecimiento, las que producen defectos desde el volteo de los árboles, hasta el aserrío y secado de su madera, limitando severamente su aprovechamiento industrial (Mutizabal, 2008).

Los primeros que han enfrentado, con un enfoque de sistema, el problema de las tensiones de crecimiento han sido investigadores australianos, quienes reconocieron que estas afectan a una de sus más importantes especies nativas, el *E. nitens*, la que posee un gran atractivo para su pyme forestal, especialmente como madera sólida de alto valor para aserrío y chapas. Efectivamente, Wood *et al.* (2008), motivados por ayudar a los propietarios de plantaciones forestales a tomar las mejores decisiones de manejo, de acuerdo a los nuevos avances en la silvicultura y tecnología de aserrío, y así optimizar los productos sólidos de alto valor, construyeron un DSS (*Decision Support System*). Este sistema de apoyo a la toma de decisiones, no es otra cosa que un sistema experto que ayuda a decidir el mejor curso de acción de una plantación de *E. nitens* para uso sólido.

Lo interesante de este DSS, son los factores principales que se consideran para rescatar el máximo valor de la plantación para madera sólida. En la figura N° 2, se muestra la estructura del sistema, donde se destaca la selección de especies, los factores del sitio, la silvicultura y las calidades de proceso. En relación al mejoramiento genético y después de

analizar los rasgos de producción de madera sólida en ensayos genéticos, Blackburn *et al.* (2011) coinciden que el mejoramiento genético es el camino para mejorar el uso sólido de esta especie pura, y además encuentran relaciones genéticas favorables para minimizar las rajaduras terminales de las trozas.



(Fuente: Wood *et al.*, 2008)

Figura N° 2
ESTRUCTURA DEL DSS PARA LA PYME FORESTAL AUSTRALIANA

En Chile, coincidente con el enfoque australiano, el Grupo PRONitens AG, Forestal MININCO SA e INFOR, a partir del año 2011, con el apoyo de FIA, han abordado la selección de especies, la silvicultura y los procesos, fundamentalmente para madera aserrada y la producción de chapas. En relación a la selección de especie se ha considerado prioritario el uso de la especie pura, *E. nitens*. Su estrategia de selección para obtener bajas tensiones de crecimiento se basa en la selección indirecta de variables de fácil medición y respuestas, correlacionada con las tensiones (Apiolaza, 2009). Para esto, en primer lugar se calibran curvas NIR, para lignina/celulosa, índice de rajadura y microdeformaciones longitudinales. Una vez realizada la calibración a través de lecturas NIR, es posible seleccionar miles de árboles. Lo anterior permitirá aportar al programa del Grupo PRONitens AG – Forestal MININCO SA e INFOR, una población elite de 30 a 50 individuos de *E. nitens* con bajas tensiones de crecimiento, la que será usada como material base para huertos semilleros e hibridaciones interespecíficas.

Otro enfoque posible para analizar las tensiones es la nano-indentación, que se ha comenzado a desarrollar en la Universidad de Tennessee. Wu *et al.* (2007) lo consideran un método muy útil para estudiar las propiedades mecánicas de la madera. Ellos examinaron 10 muestras de madera de distintas especies de latifoliadas y realizaron 40 indentaciones en la capa S₂ de 5 a 9 células, para después comparar los resultados con otros obtenidos usando

la tecnología de SilviScan¹². Se midió el ángulo microfibrilar y el módulo de elasticidad, concluyendo que los resultados obtenidos con nanoindentación son bastante más robustos que los obtenidos con el uso de SilviScan.

En la Universidad del Bio Bio, Gacitúa, *et al.* (2007) desarrollaron una metodología basada en nanoindentaciones y análisis de la ultraestructura de células de madera de *Eucalyptus nitens*, para explorar los factores que generan la aparición de fallas en la madera debido a tensiones de crecimiento. Se estudió madera normal y madera con mesogrietas. Existen diferencias significativas en la frecuencia de vasos y módulo de elasticidad de la pared S^2 entre los dos tipos de madera estudiadas. Se identificó como causa de las mesogrietas (fractura de la lamela media y pared S_1) al factor de concentración de esfuerzos y la capacidad de almacenamiento de energía por parte de las fibras de madera, presentando ambos factores diferencias significativas entre las muestras de madera analizadas. Esta metodología, aunque muy potente, es muy lenta para procesar grandes cantidades de muestras, como las que requiere un enfoque operacional para efectuar selecciones individuales orientadas a minimizar las tensiones en *E. nitens*.

MEJORAMIENTO GENÉTICO

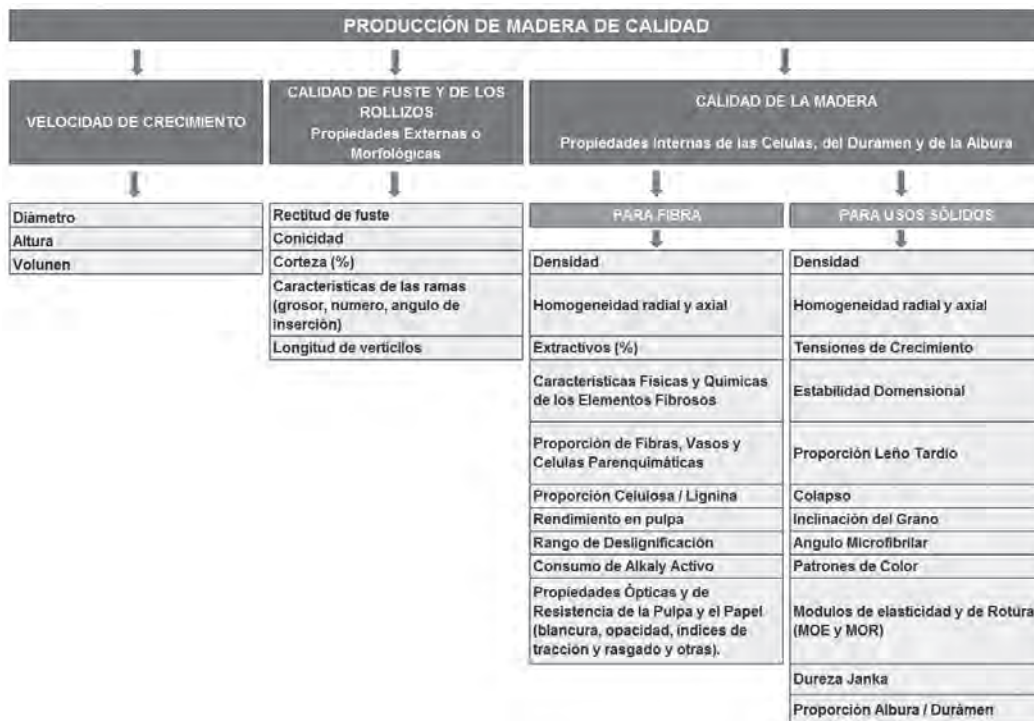
El mejoramiento genético de *E. nitens* para la obtención de madera de calidad tiene varios escenarios alternativos, el primero es bosquejar una estrategia de mejoramiento para la especie pura; un segundo escenario es considerar la formación de híbridos avanzados y un tercer escenario puede ser cambiar de especie.

Especie Pura

Valdés (2004) señala que la mejor solución para disminuir las tensiones de crecimiento es el mejoramiento genético, expresión taxativa y que requiere de mayor análisis y fundamentos.

El diagrama bosquejado por López (2005) (Figura N° 3), permite entender en mejor forma qué variable deberá enfrentar el mejoramiento genético para mejorar la madera de *E. nitens*. En el mundo y en especial en Chile, la selección de árboles en la primera generación de los programas de mejoramiento genético, se ha realizado fundamentalmente sobre las variables de volumen y en algunos casos de rectitud. La intensidad de selección ha sido en general alta en esta primera generación, compensando de este modo la baja heredabilidad del volumen. Ya en la segunda generación, las empresas forestales que disponen de programas individuales o cooperativos de mejoramiento genético han dedicado algún esfuerzo a buscar una mejor calidad de la madera, en particular en mejorar el rendimiento pulpable, y la densidad de la madera. Hay evidencias que el mejoramiento genético para aptitudes pulpables no va a tener un impacto negativo y en algunos casos puede tener aspectos positivos sobre la calidad de la madera para la producción de madera aserrada (Kube y Raymond, 2001). Por lo tanto, el material genéticamente mejorado que está disponible hoy en Chile, debería ser lo utilizado como punto de partida preferencial en el mejoramiento para la calidad de la madera de uso sólido.

12 <http://www.fbs-research.com/posters/fbs-silviscan-web.pdf>



(Fuente: López, 2005)

Figura N° 3
VARIABLES DE INTERÉS PARA LA PRODUCCIÓN DE MADERA DE EUCALIPTO

La evaluación de tensiones de crecimiento, expresadas como índices de rajaduras en *E. grandis*, no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre 21 procedencias de esa especie. De igual forma, Mutizabal (2008), estudiando las tensiones de crecimiento en procedencias de *E. nitens*, detecta una gran dispersión de los valores de tensión, pero tampoco encuentra diferencias significativas entre las procedencias evaluadas. Por su parte, Chauhan y Walker (2004) estudiaron la variación de tensiones de crecimiento en cuatro procedencias de *E. cloeziana* sin detectar diferencias significativas entre ellas. En general se puede concluir que la variación observada puede ser atribuida a factores genéticos, tratamientos silviculturales y condiciones del medio ambiente, como sitio, altitud y exposición al viento, entre otras.

En efecto, las tensiones de crecimiento constituyen un rasgo apropiado para mejorarlo genéticamente en la medida que cumpla con tres condiciones básicas: (i) que exhiba variabilidad entre individuos, (ii) que esta variabilidad tenga un importante grado de control genético y (iii) que el carácter a mejorar sea de interés económico. Al respecto, parece no haber duda sobre el cumplimiento de las condiciones (i) y (iii), en cuanto a (ii) existe evidencia de que alguna proporción de la variabilidad es atribuible a factores ambientales, pero también hay antecedentes de buena heredabilidad para la característica rajadura en eucaliptos (e indirectamente también para tensiones de crecimiento (Pádua *et al.*, 2004; Murphy *et al.*, 2005; Santos *et al.*, 2004)). En muchos casos, la baja heredabilidad se debe a la enorme dificultad de evaluar rigurosamente las tensiones longitudinales de crecimiento en los arboles del bosque con el extensómetro de CIRAD-Forêt.

En esta situación, si bien los valores de heredabilidad indicarían que existe control genético de las tensiones y sus efectos, las eventuales ganancias o progresos obtenidos no necesariamente serán consistentes debido a las distorsiones en la respuesta del material mejorado, como consecuencia de su alta susceptibilidad a factores ambientales. Así, si bien las tensiones de crecimiento dependen del genotipo, los efectos ambientales provocan cambios significativos en la expresión de algunos materiales a través de diferentes sitios (Schacht y García, 1998), esto podría indicar que existe una gran interacción genotipo ambiente.

Las rajaduras en eucaliptos están directamente relacionadas con tensiones de crecimiento (Chauhan, 2008; Raymond *et al.*, 2004; Valencia *et al.*, 2011; Yang and Pongracic, 2004; Yang and Waugh, 2001). También se conoce que las tensiones tienen una componente de silvicultura muy fuerte (Cardoso-Junior *et al.*, 2005; 2007; Biechele *et al.*, 2009), a esto hay que agregarle una componente genética importante y que es la que se puede explotar a través de la selección de líneas de progenitores adecuadas.

Como dificultad adicional para sobrellevar el problema de las tensiones de crecimiento y de los defectos asociados a las mismas, con el enfoque de mejoramiento genético, se destaca que la selección de los árboles a considerar en el programa de mejoramiento es particularmente compleja. Esta situación es consecuencia de que las tensiones de crecimiento no pueden ser medidas en forma directa, sino que deben estimarse mediante la determinación de la tensión = micro deformaciones longitudinales * Módulo de Elasticidad. Las micro deformaciones se estiman a través de un extensómetro y el módulo de elasticidad a través de otro método no destructivo, como es el uso del instrumento TreeSonic, este es un producto Fakopp¹³, diseñado por la empresa forestal Weyerhaeuser. Estos parámetros exhiben gran variabilidad, son difíciles de estimar y sus mediciones no siempre son representativas de la situación del árbol completo.

Una de las formas de medición indirecta más confiable de las tensiones de crecimiento es la medición de las rajaduras ocurridas en los extremos de las trozas. Este es un método destructivo, que se conoce como Índices de Rajaduras; en Chile se utiliza el índice de rajadura denominado CSIR (relacionado al Instituto Forestal de Sudáfrica). Este índice se encuentra fuertemente correlacionado con las rajaduras ocurridas en tablas y manifiesta moderados a altos valores de heredabilidad. Sin embargo, el desarrollo de un programa de mejoramiento requiere la utilización de métodos no-destructivos, que permitan un gran número de determinaciones, para aumentar la intensidad de selección y que las mismas sean de bajo costo (López y Genes, 2005). La alta intensidad de selección permite mejorar las ganancias genéticas esperadas. En este sentido, se han desarrollado varias herramientas y técnicas para estimar la magnitud de las tensiones de crecimiento en árboles en pie o trozas, existiendo aún interés por contar con un método simple, rápido y no destructivo (Yang *et al.*, 2005).

Cabe destacar el dispositivo mecánico, denominado extensómetro, desarrollado por CIRAD-Forêt de Francia, que permite evaluar la magnitud de las micro deformaciones longitudinales de las tensiones de crecimiento de árboles en pie. A pesar que dicho extensómetro ha sido utilizado en numerosas investigaciones, la literatura es controversial en cuanto su eficiencia como estimador indirecto de las tensiones de crecimiento (López

13 www.fakopp.com

y Genes, 2005), consecuentemente, su utilidad como herramienta de selección para un programa de mejoramiento genético presenta algunas limitaciones.

En efecto, el método CIRAD-Forêt ha sido usado, entre otros, por el Instituto Forestal, con el objeto de seleccionar árboles de *E. nitens* con bajas tensiones de crecimiento. Este ha permitido determinar que existe una baja correlación entre los valores de tensión medidos con extensómetro en las caras norte y sur del árbol en pie, con los valores del índice de rajadura, denominado CSIR, que este manifiesta inmediatamente después de su volteo y trozado, y tampoco con el índice estimado 24 horas más tarde. Considerando al índice de rajaduras como la evidencia visible de la manifestación de las tensiones y como la variable que los productores requieren mejorar, se observa que las mediciones efectuadas con extensómetro mediante el método CIRAD-Forêt es una metodología que tiene limitaciones dada la complejidad operacional que enfrenta el mejorador para seleccionar árboles en el bosque, donde el efecto del viento altera las lecturas objetivas.

Para tener un alta intensidad de selección contra tensiones es necesario medir muchos árboles. La mejor variable indirecta para esto es el contenido de celulosa, o inversamente, el tenor de lignina klason. La relación entre la química de la madera y la presencia de tensiones se presenta en (Bailleres *et al.*, 1995; Bamber, 1987; Okuyama *et al.*, 1994; Sugiyama *et al.*, 1993).

La estrategia de mejoramiento genético para la obtención de madera de calidad de *E. nitens* establecida por INFOR, Forestal Mininco SA y la organización PROnitens AG consideró como base la población de mejoramiento de *E. nitens* de Forestal Mininco SA, que incluye más de 1.300 familias, 300 de las cuales son individuos de primera y segunda generación. Las variables claves de ese programa de mejoramiento son volumen y densidad de la madera. Sobre dicha población se implementó una estrategia de selección indirecta, en dos etapas, para tensiones de crecimiento, en base a la relación inversa existente entre esta variable y el contenido de lignina.

En la primera etapa o calibración, se seleccionó un conjunto de 200 árboles a los que se les midió el índice de rajaduras (CSIR), las microdeformaciones longitudinales (con extensómetro) y el contenido de lignina (en laboratorio mediante método Klason). Con los resultados obtenidos se ajustó una curva que correlaciona el contenido de lignina (estimada mediante espectroscopía NIR) con las rajaduras y tensiones de crecimiento (microdeformaciones longitudinales medidas con extensómetro).

Durante la segunda etapa, a partir de 1.000 árboles localizados en ensayos de progenie y después de un largo proceso de selección en oficina y en terreno, se identificó 350 árboles superiores en volumen y densidad como candidatos para formar una población de bajas tensiones de crecimiento. A estos individuos se les determinó su contenido de lignina mediante espectrometría NIR. En esta fase, haciendo uso de la curva ajustada en la etapa de calibración, se identificó a los 30 individuos con menor incidencia de tensiones de crecimiento (mayor contenido de lignina NIR), los cuales fueron movilizados y replicados vegetativamente mediante injertación, para conformar un huerto semillero clonal. También se les extrajo semillas para establecer sus respectivas pruebas de progenies.

La estrategia de mejoramiento, será analizada en el capítulo 21 de este libro, no obstante considera tres líneas temporales para asegurar la disponibilidad de semilla mejorada

en el corto, mediano y largo plazo, y contempla el establecimiento de las bases para una futura *Población Elite de Calidad de Madera*, basada en la realización de cruzamientos controlados, ensayos de progenie e infusión de nuevo material, que permitirá que el mejoramiento genético pueda proseguir en el futuro.

Desarrollo de Híbrido

Sin lugar a dudas, la reducida capacidad de clonación de *E. nitens* impide la explotación de genotipos específicos con mínimas tensiones, obtenidos por el mejoramiento genético de *E. nitens* puro, es decir, impide la masificación clonal de las mejores selecciones en la especie. Según evaluaciones efectuadas por Tibbits *et al.* (1997) la capacidad rizogénica de *E. nitens*, siendo baja, es un rasgo con heredabilidad relativamente alta ($h^2 = 0,4-0,5$). La iniciación de raíces adventicias en estacas es difícil de obtener, está sujeta a fuerte variación estacional y se obtienen bajos porcentajes de enraizamiento. Esta situación ha sido un gran impedimento para el establecimiento de plantaciones clonales (Luckman y Menary, 2002). La misma dificultad se observa en el enraizamiento *in vitro* Gomes y Canhoto (2003).

Incluso el desarrollo del híbrido *E. nitens* x *E. globulus* que, a pesar de tener características intermedias en los rasgos tecnológicos de la madera y de resistencia al frío, exhibe una escasa manifestación de heterosis o vigor híbrido y escasa capacidad de enraizamiento (Volker, 2002).

En efecto, aún cuando *E. nitens* es la segunda especie más plantada en Australia, donde ha sido objeto de un dilatado programa de mejoramiento genético y abundante investigación, en cuanto a estrategias alternativas de masificación del material mejorado, ésta todavía se realiza casi exclusivamente con plantas generadas a partir de semillas provenientes de huertos semilleros, confirmando que el desarrollo clonal de *E. nitens* no se ha verificado, siendo su escasa capacidad rizogénica el principal obstáculo que ha impedido su implementación (Hamilton *et al.*, 2008). La misma situación se verifica en Chile, donde *E. nitens* es la tercera especie de importancia comercial.

La obtención de híbridos se basa en el uso de la tecnología de polinización controlada para generar una población de híbridos interespecíficos, que combinen las ventajosas características de *E. nitens* con las bajas tensiones y alta capacidad rizogénica de individuos selectos de determinadas especies complementarias que se usan en los cruzamientos. La aplicación de tecnologías de cruzamientos controlados entre distintas especies y genotipos de *Eucalyptus* puede variar, pero como primera aproximación se puede usar la tecnología clásica de cruzamiento controlado con bolsa de aislamiento (Espejo *et al.*, 1996). En términos experimentales y alternativos, se puede usar la AIP (*Artificially Induced Protogyny*), técnica que consiste en la transformación artificial de protandria en protoginia, obtenida por el corte de la cima de la yema floral, lo que equivale al tercio superior del estilo. Esto se realiza en la etapa de pre antesis, es decir cuando la flor está aún cerrada, el polen se aplica inmediatamente después del corte. El uso de esta tecnología con huertos clonales *indoor* (invernadero) permite el cruzamiento controlado a gran escala, permitiendo generar familias de hermanos completos y mejorar la productividad operacional de 35 a 400 flores polinizadas por persona por hora (Assis, 2011), el único problema de la técnica es que a veces el estigma de *E. nitens* presenta una forma espiralada que dificulta la operación.

Otra tecnología alternativa es la OSP (*One Stop Pollination*) (Harbard, *et al.*, 1999). Un aspecto clave a considerar en un programa de hibridación, es la mantención de los

genotipos de interés potencial en un estado juvenil, de otra manera ellos pierden rápidamente su capacidad de enraizamiento con la edad (Pâques *et al.*, 2002). Para ello, existen variadas alternativas, que contemplan desde el manejo de setos hasta la preservación en condiciones *in vitro*, y al respecto diversos autores señalan a la criopreservación como uno de las técnicas más apropiadas para este propósito, dado que es un método rápido, relativamente sencillo, no altera la estabilidad genética del material, reduce los costos, requiere poco espacio y evita los riesgos fitopatológicos y fisiológicos que se presentan en los bancos de germoplasma vegetales, tanto *in vivo* como *in vitro* (Engelmann, 2000; Rao, 2004; Padayachee *et al.*, 2009).

En la Figura N° 4 se ha bosquejado un modelo de programa para la obtención de híbridos comerciales en tres trienios, la certidumbre de los resultados va aumentando a medida que se progresa en el tiempo, es decir a medida que maduren las pruebas clonales híbridas.

El proceso propuesto se inicia con un grupo denominado población base, conformada por 30 individuos de *E. nitens* puros de bajas tensiones de crecimiento (Figura N° 4). El otro grupo se conoce como especies complementarias, con las que se establece una matriz de cruzamiento, donde se pueden utilizar diseños de cruza tales como los indicados por Ipinza (1998).

Entre las especies complementarias se puede utilizar las recomendadas por el conocimiento experto de mejoradores para focalizar la variabilidad hacia minimizar las tensiones y maximizar el enraizamiento. Incluso, se deben considerar híbridos *E. globulus* x *E. nitens* o complejos, de probadas características para la producción de madera sólida y especies con mínimas tensiones y con gran capacidad de enraizamiento. En las etapas pertinentes se debe utilizar controles que ya tengan comportamientos probados, por ejemplo en cantidad de semilla.

De acuerdo con la teoría genética y los antecedentes de la literatura, se espera que el híbrido, un producto nuevo, tenga características de calidad de madera intermedia entre ambos progenitores. Es decir, si se selecciona un progenitor de *E. nitens* con bajas tensiones y la especie complementaria no presenta tensiones, el híbrido resultante presentará mucho menos tensiones que el progenitor de más altas tensiones.

Si además la especie complementaria tiene gran capacidad rizogénica, el híbrido resultante en relación a la especie pura mejorará significativamente esta característica. Por lo mismo, esta solución tiene un potencial interesantísimo para poder impactar a corto plazo en el problema de las tensiones de crecimiento de *E. nitens*.

En las pruebas de enraizamiento en invernadero la viverización también se recomienda realizarla en base a un diseño experimental que considere repeticiones y testigos de buena capacidad de enraizamiento, para de esta forma controlar problemas locales en el invernadero.

Los ensayos genéticos en terreno se deben planificar en diseños con estructura familiar, con repeticiones y testigos que permitan confirmar progresivamente la veracidad de la hipótesis planteada. Esto permitirá generar antecedentes respecto al desempeño de distintas cruza híbridas, diseñadas específicamente para reducir tensiones y mejorar enraizamiento.

Por último, es importante considerar que el modelo de desarrollo de híbridos para mejorar el rendimiento industrial de *E. nitens* debe ir acompañado del criterio que todo progreso genético debe ser liberado inmediatamente a plantaciones operacionales, de forma tal que el

material generado aumente progresivamente su grado de certidumbre y disminuya el riesgo. Durante los tres primeros años los productos resultantes tienen un grado de incertidumbre moderado y luego este va mejorando progresivamente, ya que las pruebas genéticas van acercándose a la rotación o turno del híbrido.

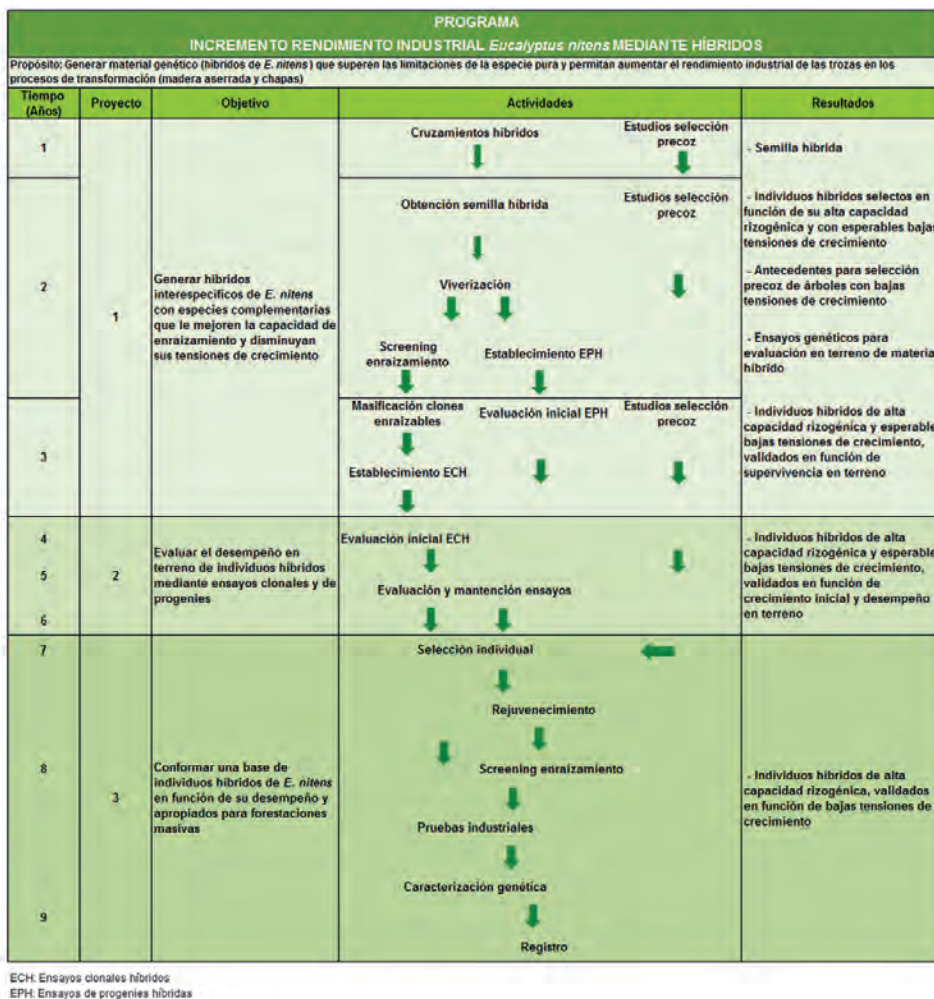


Figura N° 4
PROGRAMA DE HIBRIDACIÓN PARA INCREMENTAR EL RENDIMIENTO INDUSTRIAL DE *E. nitens*.

CONCLUSIONES

La obtención de madera de calidad en *E. nitens*, es un proceso que requiere utilizar tecnología compleja y de alta especialización. Las tensiones de crecimiento, de acuerdo al estado de arte, son posibles de abordar en forma eficiente, en especial si se parte de una población de mejoramiento de generación avanzada. Lo fundamental es atacar el problema en primer lugar mejorando las tensiones de crecimiento de la especie pura, a través de la selección indirecta de respuestas correlacionadas de fácil medición extensiva, como es la composición química de la madera por NIR. Para eso hay que verificar dicha relación en ensayos de progenie.

Como segundo escenario de mejoramiento se cree posible disminuir aún más las tensiones generando híbridos entre *E. nitens* y nuevas especies de mejor capacidad rizogénica y calidad de madera, de modo de implementar una silvicultura clonal específica para producción de madera aserrada de alta calidad.

REFERENCIAS

Alfenas, A.C.; Guimarães, L. M.; Graça, R. N.; Alfenas, R. F.; Zaperlon, T. G.; Rosado, C. C.; Zauza, E. A.; Mafia, R. G. and Coutinho, M. M. 2011. Minimizing disease risks in eucalypts plantations. Proceedings Simposio IUFRO International Working Group 2.08.03 Improvement and Culture of Eucalypts. Porto Seguro, Bahia, Brazil 14th to 18th november 2011. Pp: 51-53

Apiolaza, L. 2009. Very early selection for solid wood quality: screening for early winners. Ann. For. Sci. 66 (2009) 601.

Assis, T.F. 2011. Hybrids and mini-cutting: a powerful combination that has revolutionized the *Eucalyptus* clonal forestry. BMC Proceedings 2011 5 (Suppl 7):118. d.o.i <http://www.biomedcentral.com/qc/1753-6561/5/S7/i18>.

Bailleres, H.; Chanson, B.; Fournier, M.; Tollier, M.T. and Monties, B. 1995. Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'*Eucalyptus*. Annales des Sciences Forestières.52:157-172.

Bamber, RK. 1987. The origin of growth stresses: A rebuttal. IAWA Bulletin 8:80-84.

Barros, S. y Rojas, P. 1989. Crecimiento y Rendimiento. En: Prado, J. y Barros, S. (eds). 1989. *Eucalyptus* Principios de Silvicultura y Manejo. INFOR-CORFO. Santiago. Capítulo VIII. Pp: 101-145.

Biechele, T.; Nutto, L. and Becker, G. 2009. Growth strain in *Eucalyptus nitens* at different stages of development. Silva Fennica 43:669-679.

Blackburn, D.; Harwood, C.; Innes, T.; Potts, B. and Williams, D. 2009. Genetic variation in wood stiffness and sawn board checking traits in *Eucalyptus nitens*. Paper in 'Proceedings of Australasian Forest Genetics Conference, 19th - 23rd April, Freemantle, Western Australia.

Blackburn, D.; Hamilton, M.; Harwood, C.; Innes, T.; Potts, B. and Williams, D. 2010. Stiffness and checking of *Eucalyptus nitens* sawn boards: genetic variation and potential for genetic improvement. Tree Genetics and Genomes 6(5): 757-765.

Blackburn, D.P.; Hamilton, M.G.; Harwood, C. E.; Innes, T. C.; Potts, B. M. y Williams D. 2011. Genetic variation in traits affecting sawn timber recovery in plantation-grown *Eucalyptus nitens*. Annals of Forest Science. 68:1187–1195

Blakemore, P. et al. 2010. Plantation-grown *Eucalyptus nitens*: Solid wood quality and processing performance on linear sawing systems with a range of commercial and experimental drying schedules. In: CRC for Forestry Technical Report 200 (2010): Cooperative Research Centre for Forestry, College Road, Sandy Bay, Tasmania, Private Bag 12, Hobart, Tasmania 7001 Australia. 51p.

Blakemore, P. and Northway, R. 2009. Review of, and recommendations for, research into preventing or ameliorating drying related internal and surface checking in commercially important hardwood species in south-eastern Australia. In: Project No: PNB047-0809 (2009) Level 4, 10-16 Queen St, Melbourne, Victoria, 3000: Forest & Wood Products Australia Limited. 84.

Cardoso-Junior, A.A.; Trugilho, P.F.; Lima, J.T. and Rosado, S.C.S. 2007. Efeito dos tratamentos silviculturais sobre a deformação residual longitudinal em clones de *Eucalyptus*. Scientia Forestalis (2007) 75:77-84.

Cardoso-Junior, A.A.; Trugilho, P.F.; Lima, J.T.; Rosado, S.C.S. and Mendes, L.M. 2005. Deformação residual longitudinal em diferentes espaçamentos e idades em clone de híbrido de *Eucalyptus*. Cerne (2005) 11:218-224.

Chauhan, S. and Walker, J. 2004. Relationships between longitudinal growth strain and some wood properties in *Eucalyptus nitens*. Australian Forestry. Vol. 67, No. 4 pp. 254–260.

Chauhan, S.S. 2008. Pairing Test and Longitudinal Growth Strain: Establishing the Association. In: Proceedings of the 51st International Convention of Society of Wood Science and Technology. Concepcion, Chile.

Engelmann, F. 2000. Importance of cryopreservation for the conservation of plant genetic resources. In: Engelmann F, Takagi H (eds) Cryopreservation of tropical plant germplasm: current research progress and application. JIRCAS, Tsukuba/IPGRI, Rome. Pp: 8–20.

Espejo, J.; Ipinza, R. y Potts, B. 1996. Manual de cruzamientos controlados de *Eucalyptus nitens* (Deane et Maiden) Maiden y *Eucalyptus globulus* Labill. Cooperativa de mejoramiento Genético UACH, CONAF y Empresas Forestales. 47 p.

Gacitúa, W.; Ballerini, A.; Lasserre, J. y Bah, D. 2007. Nanoindentaciones y ultraestructura en madera de *Eucalyptus nitens* con micro y meso grietas. Maderas. Ciencia y tecnología 9(3): 259-270.

Gomes, F. y Canhoto, J. 2003. Micropropagation of *Eucalyptus nitens* (Shining Gum). *In Vitro Cell Developmental Biology Plant* 39(3): 316-321. En: <http://www.jstor.org/pss/4293616>. (Consulta: septiembre, 2011).

Hamilton, M.; Joyce, K.; Williams, D.; Dutkowski, G. and Potts, B. 2008. Achievements in forest tree improvement in Australia and New Zealand. 9 Genetic improvement of *Eucalyptus nitens* in Australia. *Australian Forestry* 71 (2): 82-93. En: <http://eprints.utas.edu.au/6788/>. (consulta septiembre, 2011)

Harbard, J.L.; Griffin, A.R.; Espejo, J. 1999. Mass Controlled pollination of *Eucalyptus globulus*: a practical reality. *Can. J. For. Res.* 29: 1457-1463.

INFOR, 2006. ¿Por qué *Eucalyptus nitens*?. En: <http://www.infor.cl/nitens/>

Ipinza, R., 1998. Diseños de Cruzamientos. En: Curso Mejora Genética Forestal Operativa. 16-21 noviembre de 1998, Valdivia, Chile. pp. 233-247

Kube, P.D. and Raymond, C.A. 2001. Genetic parameters for *Eucalyptus nitens* solid wood traits and relationships with pulpwood traits. In: IUFRO Symposium on Developing the Eucalypt for the Future. CD-Rom communication. Instituto Forestal (INFOR), Valdivia, Chile.

López, J. 2005. Mejoramiento genético de la calidad de la madera. En: 1ra Jornada sobre el potencial foresto industrial del eucalipto en Santiago del Estero. Santiago del Estero, Argentina. 16-17 de junio de 2005. 6 p.

López, J. y Genes, P. 2005. Ajuste y validación de un método no destructivo para seleccionar genotipos de *Eucalyptus grandis* con bajo nivel de tensiones de crecimiento. En: 3er Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. 6 al 9 de septiembre de 2005. Corrientes, Argentina. 12 p.

Luckman, G. y Menary, R. 2002. Increased root initiation in cuttings of *Eucalyptus nitens* by delayed auxin application. *Plant Growth regulation* N° 38, Pp: 31-35. En: <http://resources.metapress.com/pdf-preview.axd?code=j062333212630148&size=largest> (consulta septiembre, 2011).

Machado de Fonseca, S.; Vilela de Resende, M.; Alfenas, A.; da Silva Guimaraes, L.; de Assis, T. Y Grattapaglia, D. 2010. Manual Prático de Melhoramento Genético do Eucalipto. Universidade Federal de Vicosa. Editorial UFV. 200 p.

Murphy, T.N.; Henson, M. and Vanclay, J.K. 2005. Growth stress in *Eucalyptus dunnii*. *Australian Forestry* (2005) 68:144-149.

Mutizabal, A. 2008. Comportamiento de tensiones de crecimiento en tres procedencias de *Eucalyptus nitens* en la Región del Bio Bio. Tesis Fac. Cs. Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia. Chile. 44 p + anexos.

Okuyama, T.; Yamamoto, H.; Yoshida, M.; Hattori, Y. and Archer, R.R. 1994. Growth stresses in tension wood: Role of microfibrils and lignification. *Annales des Sciences Forestières* (1994) 51:291-300.

Pádua, F.A.; Trugilho, P.F.; Rosado, S.C.S.; Lima, J.T.; Cardoso-Junior, A.A. y Oliveira, A.C. 2004. Estimativa de parâmetros genéticos das tensões de crescimento em clones de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis* (2004) 66:152-160.

Padayachee, K.; Watt, M.; Edwards, N. and Mycock, D. 2009. Cryopreservation as a tool for the conservation of *Eucalyptus* genetic variability: concepts and challenges. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 71(2):165-170.

Pâques, M.; Monod, V.; Poissonnier, M. y J. Dereuddre. 2002. Cryopreservation of *Eucalyptus* spp. Shoot Tips by the Encapsulation-Dehydration Procedure. Cryopreservation of plant germplasm II. Eds. Towill, L.E. y Bajaj, Y.P.S. 396 pp.

Prado, J. y Barros, S. (eds). 1989. *Eucalyptus* Principios de Silvicultura y Manejo. INFOR-CORFO. Santiago, Chile. 199 p.

Rao, N.K. 2004. Plant genetic resources: Advancing conservation and use through biotechnology. *African J. Biotech*, 3: 136-145

Raymond, C.A.; Kube, P.D.; Bradley, A.; Savage, L. and Pinkard, L. 2004. Evaluation of non-destructive methods of measuring growth stress in *E. globulus*: relationship between strain, wood properties and stress. In: Technical Report 18: CRC-SPF. 31.

Santos, P.E.T.; Geraldi, I.O. and Garcia, J.N. 2004. Estimates of genetic parameters of wood traits for sawn timber production in *Eucalyptus grandis*. *Genetics and Molecular Biology* (2004) 27:567-573.

Schacht, L.; Garcia, N.; Vencovsky, R. 1998. Genetic variation of growth stress indicators in clones of *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis* (54): 55 – 68.

Sugiyama, K.; Yamamoto, H. and Yoshida, M. 1993. Generation process of growth stresses in cell walls: relation between longitudinal released strain and chemical composition. *Wood Science and Technology* (1993) 27:257-262.

Tibbits, W.; White, T.; Hodge, G. y Joyce, K. 1997. Genetic control of rooting ability of stem cuttings in *Eucalyptus nitens*. *Australian Journal of Botany* 45(1): 203-210. En: <http://www.publish.csiro.au/paper/BT96003.htm>. (consulta septiembre, 2011).

Touza, M. 2001. Proyecto de investigación sobre sistemas de aserrado adecuados para procesar *Eucalyptus globulus* con tensiones de crecimiento. *Revista Cis - Madera*. (6): 8-37.

Trincado, G. y Lasserre, J. 2005. El desarrollo del *Eucalyptus nitens*. *Chile Forestal* (309): 25-27.

Valdés, R. 2004. Determinación de tensiones de crecimiento de *Eucalyptus nitens* mediante un método no destructivo. Tesis Fac. de Cs. Forestales. Universidad de Talca. Talca, Chile. 48 p.

Valencia, J. y Cabrera, J. 2006. Análisis económico de opciones productivas para plantaciones de *Eucalyptus nitens* en plantaciones del sur de Chile. *Revista Ciencia e Investigación*. (13): 26 - 41.

Valencia, J.C.; Harwood, C.; Washusen, R.; Morrow, A.; Wood, M. and Volker, P. 2011. Longitudinal growth strain as a log and wood quality predictor for plantation-grown *Eucalyptus nitens* sawlogs. *Wood Science and Technology* (2011) 45:15-34.

Volker, P.W. 2002. Genetics of *Eucalyptus globulus*, *E. nitens* and F1 hybrid. PhD thesis, University of Tasmania, 180 p.

Wood, M.; Volker, P.; Beadle, C.; Harwood, C. and Medhurst, J. 2008. Technical Report 188. Plantation-grown Eucalypts for high-value solid-wood products: a decision support framework.

Wu, Y.; Wang, S.; Zhou, D.; Zhang, Y.; Xing, C. and Pharr, G.M. 2007. Nano-Mechanical Properties of wood cell wall: Species Influence. 61st International Convention. Forest Products Society. June 10-13, 2007. Knoxville, TN, USA. 18 p.

Yang, J.L. and Waugh, G. 2001. Growth stress, its measurement and effects. *Australian Forestry* (2001) 64:127-135.

Yang, J.L. and Pongracic, S. 2004. The impact of growth stress on sawn distortion and log end splitting of 32-year-old plantation Blue Gum. In: Project no: PN03.1312--Corporation FaWPraD, ed. (2004).

Yang, J.; Fife, D. and Matheson, A. 2005. Growth strain in three provenances of plantation-grown *Eucalyptus globulus* Labill. *Australian Forestry* 64(4):248-256.

21. ESTRATEGIA DE MEJORAMIENTO DE *Eucalyptus nitens* PARA MADERA DE CALIDAD

Roberto Ipinza C.¹
Verónica Emhart²
Braulio Gutiérrez C.³
Maria Paz Molina B.³
Oriana Ortiz N.⁴
Patricio Rojas V.⁵
Laura Koch³
Alex Medina²
Edgardo Velilla²
Nuno Borralho⁶

INTRODUCCIÓN

El *Eucalyptus nitens* es una especie con alta adaptabilidad a las condiciones de Chile, con una de las más altas productividades observadas en *Eucalyptus* en el mundo. La especie tiene además excelente forma y sanidad. La mayoría de estos rodales se destinan a la producción de madera para celulosa. Existe sin embargo la oportunidad de aprovechar una parte de este recurso forestal para producción de madera aserrada. Esto es particularmente relevante en el caso de regiones en que las largas distancias a las plantas de celulosa desvalorizan demasiado el precio de la madera en pie para pequeños y medianos propietarios. Además constituye una alternativa importante al uso de madera de bosque nativo.

La industria para el aprovechamiento de la madera aserrada o laminada de *Eucalyptus* en general, y de *E. nitens* en particular, está bien desarrollada en el mundo, pero su utilización se ve afectada por la ocurrencia de tensiones de crecimiento y de inestabilidad dimensional en la madera, situaciones que afectan la rentabilidad del proceso y degradan la calidad del producto final.

Tales aspectos son agravados por la modalidad de manejo, basada en rodales con una estructura de plantación intensiva, de rotaciones cortas y con altas densidades de plantación, de modo que se mantenga la flexibilidad de su uso final (para celulosa, madera aserrada o ambos).

Se sabe ya que la selección genética para mejorar estas características de calidad de madera es un proceso eficiente. Ellas tienen en general una alta heredabilidad y existe suficiente variación en las poblaciones de mejoramiento en Chile para lograr cambios

1 Ingeniero Forestal, Doctor Ingeniero de Montes. Instituto Forestal. Sede Los Ríos. robertoipinza@infor.cl

2 Forestal Mininco SA. veronica.emhart@forestal.cmpc.cl; alex.medina@forestal.cmpc.cl; edgardo.velilla@forestal.cmpc.cl

3 Instituto Forestal, Sede Bio Bio. bgutierr@infor.cl; mmolina@infor.cl; lkoch @infor.cl

4 Ingeniera Forestal. oriana1.ortiz@gmail.com

5 Instituto Forestal, Sede Metropolitana. parojas@infor.cl

6 Consultor. Centro de Estudos Florestais, Universidad Técnica Lisboa, Portugal. nunuborralho@sapo.pt

significativos en características como la incidencia de rajaduras y otros defectos a través de un programa de selección y establecimiento de huertos semilleros específicos.

Aprovechando el esfuerzo de mejoramiento genético ya logrado en Chile por Forestal Mininco SA, enfocado en productividad y densidad (variables clave para la producción de celulosa), con el apoyo de la asociación de propietarios e industriales conocida como PRONitens AG y el Instituto Forestal, se propone ahora el desarrollo de una línea de mejoramiento específica para madera de calidad, de uso sólido (madera aserrada o debobinada), de modo de permitir la disponibilidad de semilla mejorada para propietarios forestales que deseen establecer rodales para este uso.

LOS PRINCIPALES ELEMENTOS DEL PROGRAMA

El Programa de Mejoramiento para Madera de Calidad de *E. nitens* se basa en la población de mejoramiento que Forestal Mininco SA ha desarrollado por más de 20 años para esta especie. Tal población, actualmente en su segundo ciclo de selecciones, tiene mejor crecimiento y mayor densidad de la madera que la semilla de *E. nitens* utilizada tradicionalmente en Chile. La productividad forestal y la densidad de madera, son características importantes para la producción de celulosa, y son igualmente relevantes para el objetivo de producir madera sólida de calidad.

Así, un aspecto fundamental del Programa de Mejoramiento para Madera de Calidad es que se inicia con material genético ya significativamente mejorado para algunas de las variables claves en el uso de madera sólida. Consecuentemente, ahora el énfasis será lograr complementar estas ganancias con una reducción en los defectos de la madera, en particular los debidos a presencia de rajaduras terminales de las trozas, tablas o chapas, aspectos considerados determinantes en el actual aprovechamiento de trozas de *E. nitens* en Chile.

El programa tendrá tres líneas temporales distintas para producción de semilla mejorada, de modo de seguir asegurando una disponibilidad de material en el corto, mediano y largo plazo, con mejores ganancias a medida que el programa avanza.

Finalmente, el programa establecerá las bases para una futura *Población Elite de Calidad de Madera*, basada en la realización de cruzamientos controlados y ensayos de progenies, que permitirán que el mejoramiento genético pueda proseguir en el futuro.

OBJETIVOS DE MEJORAMIENTO

La rentabilidad de las plantaciones destinadas a madera aserrada es un tema que todavía no está caracterizado en detalle, sin embargo se puede afirmar que dependerá de:

- En primer lugar, del crecimiento, ya sea del volumen total por hectárea o del diámetro de las trozas individuales, y en menor grado de la rectitud y otros aspectos de calidad del fuste. La productividad total está asociada a la rentabilidad de la inversión forestal y va a determinar los costos por metro cúbico en pie o cosechado. Sin embargo, desde el punto de vista del aserradero, la dimensión final del tronco y, en menor grado, su forma, son los factores que van a tener más impacto económico. Estas variables van a determinar el rendimiento del proceso de transformación industrial (tasa de recuperación o porcentaje de volumen aserrado respecto del volumen total) y, por

lo tanto, la rentabilidad de un aserradero. Solamente la productividad por hectárea es relevante para los costos de producción de madera para celulosa (Greaves et al., 1997), por lo tanto, el volumen por hectárea será siempre una variable fundamental en plantaciones de *E. nitens*, independiente de su uso final.

- En segundo lugar, la rentabilidad del aserradero va a depender de factores de calidad de la madera relacionados con la presencia de defectos. Su importancia va a depender del impacto final en la tasa de recuperación en verde, por efecto de tensiones de crecimiento y rajaduras de tronco, y de las pérdidas después de secado, por efecto de colapsos, grietas internas, combadura y torsiones.
- Finalmente, hay que considerar las características de la madera que puedan modificar los atributos finales o el valor del producto, como son su estabilidad dimensional, su durabilidad, su resistencia mecánica (relacionada con la presencia de nudos por ejemplo) y, en algunos casos, aspectos de color o textura.

En eucaliptos en general y en *E. nitens* en particular, los defectos de mayor impacto económico y de más difícil corrección tecnológica son los asociados a la presencia de rajaduras en los extremos de las trozas y piezas aserradas. En la literatura se citan valores de pérdidas por rajadura (en porcentaje de volumen) hasta de 10% (Washusen et al., 2009), estimándose que en Chile tales pérdidas podrían ser de mayor cuantía. Otros defectos de alguna importancia en *E. nitens* incluyen torsiones, colapsos y grietas internas, que sin embargo pueden ser bastante controlados durante el proceso de secado.

Por el contrario, las propiedades mecánicas típicas de la madera de *E. nitens*, como su dureza y resistencia estructural (MOE/MOR), se consideraran ya adecuadas para su uso y además muy competitivas respecto a otras fuentes y exigencias del mercado, por lo que no hay ventajas claras en incluirlas en el objetivo de mejoramiento.

Basándose en lo expuesto, las variables claves a considerar en el programa de mejoramiento genético para madera de calidad de *E. nitens* van a ser el volumen por árbol y por hectárea, las rajaduras y los defectos de contracciones y colapsos. La importancia relativa de cada una de estas variables no está todavía establecida, sin embargo en el programa actual se va a considerar el volumen y los dos tipos de defectos como de igual importancia.

CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA REDUCIR DEFECTOS

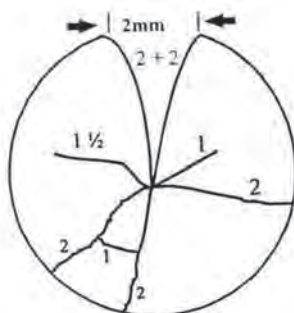
De las variables claves anteriormente descritas, solo el volumen se puede medir extensivamente en un programa de mejoramiento. El actual programa de *E. nitens* de Forestal Mininco SA dispone ya de valores de volumen por árbol (a partir de mediciones de altura y DAP), obtenidos en más de 15.000 árboles. Además, esta variable está bien caracterizada para la especie en cuanto a su heredabilidad (que es moderada). Para el rango de condiciones en Chile se sabe que *E. nitens* tiene una alta estabilidad ambiental (baja interacción genotipo-ambiente) y alta correlación entre edades de medición.

La medición del grado de defectos, sea en trozas o tableros, implica el corte y procesamiento del árbol, un proceso destructivo y oneroso, imposible de ser evaluado en muchos candidatos. Para asegurar una intensidad de selección adecuada será necesario estimar los defectos de modo indirecto, a partir de variables biológicas más sencillas de

medir y relacionadas con los defectos. Estas variables, que van a constituir los denominados *Criterios de Selección*, serán detalladas más adelante. Ellas se utilizarán para escoger a los árboles individuales que posteriormente se incorporarán al programa.

La evaluación de defectos más compleja es la de las rajaduras. Por lo mismo, en los párrafos siguientes se discute en detalle las estrategias y criterios usados para su selección. La medición directa de incidencia de rajaduras se puede hacer de distintas maneras y se puede considerar tanto en rollizos como en tablas aserradas. En el presente programa, se va a considerar solamente la rajadura en trozas, basada en un índice que será estimado a partir de la observación de las grietas en la base de cada rollizo. El valor del índice se determina mediante la suma de los puntajes de cada grieta de acuerdo con los criterios siguientes:

- 1 punto por grietas radiales de medio radio de longitud
- 1½ puntos por grietas radiales de ¾ radios de longitud
- 2 puntos por grietas radiales de un radio de longitud
- 1 punto por milímetro si la grieta se extiende en la periferia
- 1 punto por medio radio de longitud para grietas tangenciales



El índice de rajadura es la suma de todas las grietas.
En este ejemplo resulta un valor final de 13,5

Figura N° 1
EJEMPLOS DE PUNTAJE A ATRIBUIR A LAS GRIETAS
OBSERVADAS EN LA BASE Y ÁPICE DE CADA ROLLIZO

Este índice de rajadura fue propuesto inicialmente por CSIR y es muy utilizado para caracterizar el problema de rajadura en eucalipto.

CRITERIO DE SELECCIÓN PARA REDUCIR LA INCIDENCIA DE RAJADURA

En términos generales, se puede considerar que el problema de las rajaduras, tanto en rollizos como en tablas, está directamente asociado a la presencia de estrés de crecimiento en la madera, en particular en la parte más periférica del tronco. Este resulta de tensiones residuales en las células del xilema, producidas por el árbol para compensar los efectos de su peso, inclinación del tronco o ramas, o el efecto continuado del viento. La reducción de la incidencia de rajaduras pasa por una reducción de tensiones de crecimiento, en especial de las que ocurren longitudinalmente en la periferia del tronco.

Un aspecto fundamental es que estas tensiones periféricas se pueden evaluar a partir de la medición de las distensiones (*strains*) que ocurren en la madera. Ellas se pueden medir con el uso de un instrumento denominado Extensómetro (Yang *et al.*, 2005). En el actual

programa de obtención de madera de calidad de *E. nitens* (Instituto Forestal, PIT Nitens AG. y Forestal Mininco SA), se usa un extensómetro desarrollado por CIRAD-Forêt de Francia, que está ampliamente validado para la determinación de *Distensiones* en *Eucalyptus* (Figura N° 2) (Biechele *et al.*, 2009).

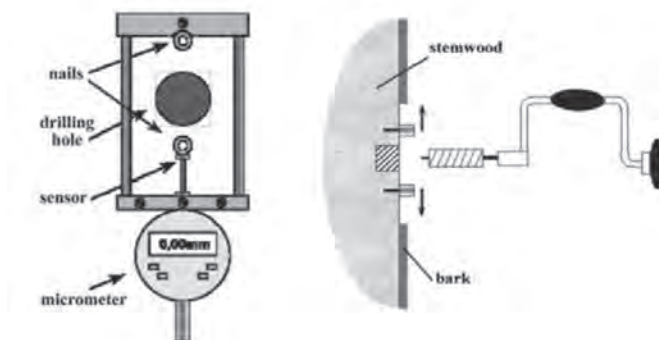


Figura N° 2

DIAGRAMA DEL EXTENSÓMETRO CIRAD-FORÊT UTILIZADO EN EL PROGRAMA PARA MEDICIÓN DE LAS DEFORMACIONES RESIDUALES LONGITUDINALES, UNA MEDIDA INDIRECTA DE LAS TENSIONES DE CRECIMIENTO Y DE LA FRECUENCIA Y SEVERIDAD DE RAJADURAS.

El Extensómetro de CIRAD mide la deformación (o desplazamiento) entre dos puntos cercanos del tronco (14 cm), que ocurre por efecto de la liberación de las tensiones de tracción existentes entre las fibras, debido a la apertura de un orificio que se practica entre ellas. Como los dos puntos se encuentran a lo largo del tronco, en la dirección axial, el desplazamiento se llama de Deformación Residual Longitudinal (DRL). El valor de esta deformación se registra en un reloj digital (en mm). El punto importante es que las Tensiones de Crecimiento Longitudinales (TCL) son proporcionales al valor de la deformación medida y se pueden calcular de acuerdo con la expresión:

$$TCL = \frac{MOE \times \Delta l}{l_0}$$

Donde: TCL es una estimación de la tensión de crecimiento longitudinal (Kgf/cm²)
 MOE es el módulo de elasticidad determinado en ensayos de flexión estática (Kgf/cm²)
 Δl = DRL es el valor medido por el extensómetro (mm)
 l_0 = 45mm es la distancia fija entre los dos clavos del marco del extensómetro antes de ocurrir la deformación (*nails* en la Figura N° 2).
 La fracción $\varepsilon = \Delta l / l_0$ mide la Distensión o "Strain" observada.

El aspecto clave es que los valores de DRL son mediciones no destructivas y, por lo tanto, bastante interesantes del punto de vista de un programa de mediciones para selección. Para eso, los valores de DRL deben tener una correlación interesante con la incidencia de rajaduras terminales, como ya ha sido demostrado en diversos estudios realizados con *E. nitens* en Chile y en otros países (Chauhan and Walker, 2004; Valencia *et al.*, 2011), aún cuando en ocasiones los resultados están asociados a un alto error experimental en las mediciones. La medición directa de DRL con extensómetros es difícil y lenta, especialmente en presencia de viento o de otros factores de variabilidad dentro del árbol. En algunos casos puede llegar a comprometer el desarrollo futuro del árbol, debido a que se deben abrir ventanas en su corteza. Por lo mismo, será muy conveniente identificar otras variables que

estén bien correlacionadas con DRL y por lo tanto con la presencia de rajaduras, pero que sean más fáciles de medir a gran escala.

Para tal efecto, algunas características químicas de la madera resultan candidatas adecuadas. Se sabe que hay una relación clara entre la presencia de tensiones en la madera y la constitución química de las paredes de las fibras, ya sea por el efecto de la hinchazón de la matriz amorfa característica de la lignina, o por cambios en la cantidad y grado de cristalización de las cadenas de celulosa (Bamber, 2001 y Bailleres *et al.*, 1995). De acuerdo con la teoría más probable, la presencia de tensiones axiales, que son las que estarán teóricamente más relacionadas con el DRL, se atribuyen a la presencia y efecto de las microfibrillas (su cantidad, ángulo y grado de cristalización de sus cadenas de celulosa), mientras que la acumulación de lignina se asocia a tensiones de tipo radial y a otros estreses de compresión (Bamber, 1987; Okuyama *et al.*, 1994). Sin embargo, los dos componentes (celulosa y lignina) se complementan, cuando uno es alto, el otro baja. En todo caso, en eucaliptos se observa que en la periferia del tronco, en que se encuentra madera con más celulosa y consecuentemente menos lignina, hay también menores ángulos de las microfibrillas y mayor grado de cristalización de la celulosa, y mayores valores de DRL. La situación opuesta se observa hacia el interior del tronco.

La posibilidad de usar la química de la madera como un criterio de selección de las tensiones, es una línea de desarrollo muy interesante, pues se han desarrollado técnicas de espectroscopia NIR (*Near Infrared Reflectance*) que permiten caracterizar la lignina o celulosa con bastante precisión y a gran escala (Bailleres *et al.*, 2002; Downes *et al.*, 2011). Esta técnica NIR exige la construcción previa de modelos de calibración, pero una vez que estos están contruidos, solo requiere algunos gramos de aserrín por árbol para poder caracterizar su composición química. Así, la estrategia de medición para reducción de las tensiones se podrá basar en la medición de la química de la madera. En términos operacionales, eso consistirá en evaluar los contenidos de lignina y celulosa a partir de NIR, como variables predictoras de la presencia de tensiones. Se analizará más adelante la posibilidad de evaluar el MFA¹ y el grado de cristalización para también ser modeladas a partir de NIR.

CRITERIO DE SELECCIÓN PARA REDUCIR LOS COLAPSOS INTERNOS Y CONTRACCIONES

Los fenómenos de colapso y en particular la formación de grietas internas y contracciones dimensionales son de menor importancia en la madera de *E. nitens* en Chile, sin embargo continúan siendo aspectos clave a considerar en su mejoramiento. Se sabe que las contracciones que se manifiestan en las tablas pueden deberse a una contracción normal, por pérdidas de humedad bajo el punto de saturación, o deberse a una contracción por colapso, que ocurre al inicio del secado, cuando el lumen de las células todavía está saturado de agua. Es este último fenómeno el que más se relaciona con la ocurrencia de grietas internas. La contracción normal provoca colapsos superficiales en las etapas finales del aserrado, los que en gran medida se pueden corregir significativamente con procedimientos adecuados de control de humedad durante el secado. Por el contrario, las contracciones internas (colapsos internos) son las que constituyen los problemas más difíciles de resolver.

1 MFA: Ángulo de las microfibrillas

La medición directa del colapso, o de las contracciones tangenciales, se puede hacer con éxito en probetas, como han sugerido Kube y Raymond (2005). Sin embargo este método tiene la limitación de ser difícil de implementar a gran escala. Al revés, hay bastante evidencia en *Eucalyptus* que esas contracciones se correlacionan con la densidad de madera. Distintos autores reportan coeficientes de correlación entre -0.35 y -0.75 (Kube and Raymond, 2005; Purnell 1988; Hamilton *et al.*, 2009). Eso es una relación importante, pues se dispone de abundantes datos de densidad en la actual población de mejoramiento de la empresa Forestal Mininco SA. Así, la selección previa de densidad se espera que resulte en una reducción indirecta del colapso (Hamilton *et al.*, 2010). Por otra parte, el incremento en densidad de la madera también se espera que mejore su MOE/MOR que está asociado a la resistencia mecánica y la dureza. También, algunos autores presentan correlaciones positivas entre el DRL y la estabilidad dimensional o las torsiones (Chauhan and Walker, 2004; Valencia *et al.*, 2011).

En conclusión, la densidad deberá constituir un criterio de selección útil e importante en bajar la incidencia de contracciones y en particular de grietas internas y mejorar la resistencia mecánica de la madera. La evaluación de densidad se puede realizar a partir de mediciones a 1,3 m de altura en tarugos o indirectamente por mediciones de penetración de Pilodyn. Ambos métodos han sido utilizados por Forestal Mininco SA en su programa y muestran una buena relación con la densidad de las trozas (Greaves *et al.*, 1996; Raymond y MacDonald, 1998).

En el Cuadro N° 1 se hace un resumen de las variables claves, su ponderación relativa, el criterio de selección usado y una aproximación de las correlaciones entre criterio y objetivo.

Cuadro N° 1
VARIABLES CLAVE EN EL OBJETIVO DE MEJORAMIENTO PARA CALIDAD DE MADERA, RESPECTIVOS
CRITERIOS DE SELECCIÓN Y VALORES APROXIMADOS DE IMPORTANCIA RELATIVA
Y DE PARÁMETROS GENÉTICOS

Variable en el Objetivo	Unidad	Importancia Relativa	Criterio de Selección	Correlación entre Objetivo y Criterio	Heredabilidad del Criterio
Volumen	(m³/Arb)	1	DAP y/o Altura	0,80	0,20
Rajadura	(Índice CSIR)	1	Lignina y otros por NIR	0,50	0,30
Contracción o Colapso	(% de área)	1	Densidad por Pilodyn (Pil)	0,50	0,40

ESTRATEGIA DE MEJORAMIENTO

Población Base del Programa

La población a desarrollar específicamente para calidad de madera se originará a partir de selecciones a realizar entre y dentro de familias de segunda y tercera generación, establecidas en ensayos genéticos del programa de mejoramiento de Forestal Mininco SA (designada como Población Base MININCO en la Figura N° 3).

Esta Población Base MININCO tuvo su inicio en 1990 a partir de dos programas de mejoramiento distintos, uno conducido por FAMASA (Forestal y Agrícola Monteágüila) y otro por Forestal Mininco SA, ambos integrados hoy en un solo programa. La población incluye un total de más de 1.300 familias, 300 de las cuales son ya de tercera generación. Este amplio

conjunto de familias está representado en diversos ensayos de progenie, que en la actualidad continúan siendo medidos para crecimiento, densidad y otras variables.

Población de Calidad de Madera

Para conformar la Población de Calidad de Madera, se identificará a cerca de 300 familias de la Población Base Mininco, con base en su información de volumen (derivada de mediciones de DAP y Altura) y de colapso (derivada de mediciones de Pilodyn (Pil) o de densidad en tarugos), para eso se dispone de información de más de 15.000 progenies de más de 1.000 familias de polinización abierta, establecidos en 14 ensayos de campo.

Con la disponibilidad de un modelo NIR para determinación de tensiones (a partir del valor estimado NIR para lignina y Tensión Longitudinal), se podrá seleccionar a partir de esta Población de Calidad de Madera, los mejores individuos, ya sea para colecta inmediata de semilla para futuros ensayos de progenie de polinización abierta, como para el establecimiento de nuevos huertos semilleros clonales (Nuevo HSC en Figura N° 3).

Líneas de Desarrollo Operacionales

Las salidas operacionales del programa de mejoramiento para calidad de madera están estructuradas en cuatro líneas de actividad, que involucran distintos plazos, grados de complejidad y de ganancia genética esperada. A continuación se detalla cada una de las líneas.

- **Línea 1: Oferta inmediata de semilla mejorada a partir del huerto semillero clonal de alta densidad (HSC1:4)**

Esta línea permite la obtención temprana de semilla mejorada, sobre la base de un Convenio de Colaboración entre Forestal Mininco SA, PRONitens AG y el Instituto Forestal. La semilla provendrá de un Huerto Semillero Clonal de alta densidad, ya establecido y en producción, propiedad de Forestal Mininco SA, que en el diagrama de la Figura N° 3 se identifica como HSC1:4.

Este huerto está constituido por madres que fueran previamente seleccionadas simultáneamente para volumen y densidad, usando un ponderador de 1 para la primera variable y de 4 para la segunda.

- **Línea 2: Oferta a corto plazo de semilla mejorada**

Con la finalidad de incrementar el valor para aserrado de la semilla disponible en el corto plazo, se estimará el valor genético de las madres presentes en el HSC1:4 en lo que respecta a la variable rajadura, de modo de colectar semillas solamente de las mejores madres para esta variable.

Esto es posible, pues la mayoría de estas madres tienen progenies en ensayos de campo. En ellos se hará la evaluación de lignina y DRL en sus progenies (8 por familia) utilizando la metodología NIR.

- **Línea 3: Oferta a mediano plazo de semilla mejorada: El Nuevo Huerto Clonal para Calidad de Madera (Nuevo HSC)**

Esta línea permitirá desarrollar un nuevo huerto semillero clonal (Nuevo HSC), a partir de material seleccionado conjuntamente por crecimiento, densidad y bajos niveles de rajaduras.

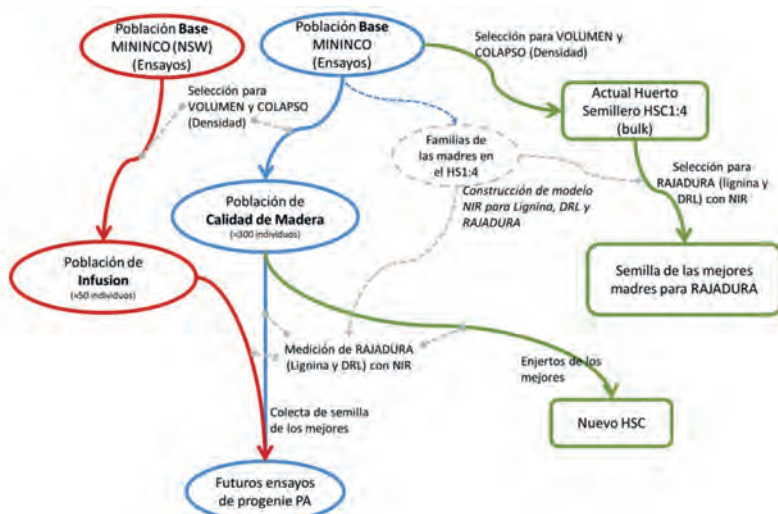
Incluirá una primera etapa de selección para crecimiento y densidad en la Población Base de Mininco, en un total de cerca de 300 árboles.

En una segunda etapa, estos árboles serán evaluados mediante NIR para DRL y lignina, de modo de identificar entre ellos a los mejores 30 individuos (o 10% de los evaluados), los que serán injertados y transferidos a un futuro huerto semillero clonal.

- **Línea 4: Mejoramiento genético a largo plazo**

Los 30 árboles seleccionados en la Línea 3 constituirán la población de madres elite para el mejoramiento a largo plazo de madera sólida.

A partir de esta población se podrán coleccionar semilla de polinización abierta o desarrollar programas de cruzamientos controlados y establecimiento de nuevos ensayos de progenie.



Línea 1: Grupo PRONITENS AG usa el material del huerto semillero HSC1:4 de Forestal Mininco.

Línea 2: Colecta de semillas de las mejores madres del HSC 1:4, identificadas mediante análisis NIR de muestras de aserrín.

Línea 3: Establecimiento de un huerto semillero clonal específicamente para bajas tensiones de crecimiento y la producción de los futuros ensayos de progenie que constituyen la futura población de mejoramiento (Línea 4).

Figura N° 3
DIAGRAMA DE LAS LÍNEAS DE DESARROLLO OPERACIONAL DEL PROGRAMA

Detalles de los Criterios de Selección de Cada Línea

- **El Corto Plazo: Semilla de Huerto Semillero Clonal 1:4 (Líneas 1 & 2)**

Línea 1

El programa de mejoramiento de Forestal Mininco SA ya ha establecido huertos semilleros de alta densidad, constituido por madres que fueran seleccionadas por volumen, pero con una ponderación bastante fuerte para densidad de la madera. La intención de Forestal Mininco SA al establecer estos huertos fue disponer de material genético para celulosa con un bajo consumo específico de madera. Considerando que la densidad se correlaciona bien

con el colapso, dureza y MOE/MOR (Kube y Raymod, 2005), también se esperan mejoras en estas variables respecto a la semilla comercial no mejorada de *E. nitens*. Su valor genético para incidencia de rajaduras es desconocido, sin embargo se deberá admitir que tendrá una calidad típica comparable a la no mejorada del *E. nitens*.

Línea 2

Con el objetivo de mejorar la calidad de la semilla, específicamente en lo que respecta a incidencia de rajaduras, en la Línea 2 se propone hacer una medición indirecta de esta variable, a partir de evaluaciones NIR, en muestras de madera colectada en las progenies de las madres presentes en el Huerto HSC1:4. Posteriormente, con base en esta información, se colectará semilla solamente de las mejores madres. Así, el índice usado para la selección de las madres será:

$$I = P_{Raj}$$

Donde: P_{Raj} representa el promedio de la estimación NIR de las variables lignina y DRL efectuada con aserrín colectado en 8 a 10 progenies por familia de polinización abierta. Esta selección será solamente para rajadura.

- El Largo Plazo – Nuevo Huerto Semillero Clonal para Calidad de Madera (Línea 3) y creación de la futura Población de Mejoramiento (Línea 4)

Etapas de Selección y Constitución de la Población Calidad de Madera (PCM)

La selección de la Población de Calidad de Madera se basa en los resultados del análisis BLUP global, realizada como parte del programa de Forestal Mininco S.A y sigue tres etapas:

-Etapa 1: Elección de las mejores 200 familias del Programa Mininco (200:385) usando como objetivo H_1 :

$$H_1 = 1 * Vol + 1 * Den$$

Donde: La información de volumen (Vol) se basa en mediciones de DAP y altura. La información de densidad de la madera (Den) se basa en mediciones efectuadas con Pilodyn (Pil) en las progenies.

-Etapa 2: Elección de los mejores 300 hijos de las 200 familias (aprox. 300:15.000), con restricción en el número de hijos a incluir por familia. Se consideró el mismo objetivo:

$$H_2 = 1 * Vol + 1 * Den$$

Donde: La información de volumen y densidad proviene de mediciones de DAP y Pilodyn efectuadas en el árbol candidato y sus hermanos.

En la elección final de los cerca de 300 árboles candidatos, se agregaron algunos criterios restrictivos relativos a forma del fuste, presencia de torsiones, enfermedades o asimetrías de copa.

-Etapa 3: Selección final de los mejores 30 árboles (30:300), considerando el objetivo:

$$H_3 = 1 * Raj$$

Donde: La información de rajaduras (Raj) se basa en una estimación BLUP a partir de los valores NIR de DRL y Lignina para cada árbol y sus hermanos.

Establecimiento del Nuevo Huerto Semillero Clonal de la Población Seleccionada de Calidad de Madera

Los 30 árboles seleccionados en la etapa 3 anterior serán injertados e instalados en un nuevo Huerto Semillero Clonal para Calidad de Madera. Se espera que la semilla de este huerto esté disponible a partir de 2018 o antes.

Establecimiento de la Población de Mejoramiento para Calidad de Madera

Las mismas 30 selecciones anteriores permitirán la creación de una nueva generación de mejoramiento a partir de familias de polinización abierta (PA) y controlada (PC) generadas mediante el cruzamiento de los árboles selectos, las cuales se establecerán en futuros ensayos de progenie. Estos ensayos considerarán:

- Ensayos de Progenie Avanzados PA: Se establecerán a partir de semilla de polinización abierta colectada en los mejores árboles presentes en los Ensayos de Progenie MININCO (de las 300 evaluadas). En estos ensayos se usarán como testigos la semilla del Huerto HSC1:4, discriminados por familias de madre. Estas pruebas se establecerán en terreno el año 2013 o 2014
- Ensayos de Progenie Avanzada de Huerto PA+PC: A medida que el material en el Huerto Semillero Clonal PCM presente floración, se realizarán polinizaciones controladas y colecta de semilla de hermanos completos (*full sibs*). Estas familias serán establecidas en nuevos ensayos de progenie a partir del año 2019.

En estos ensayos, típicamente de diseño estadístico en *Single Tree Plots*, con unas 15 réplicas y un espaciamento de 3 x 3 m, se usarán de nuevo como testigos la semillas del Huerto HSC1:4 (Línea 1), discriminando por familias de madre. También se considerará como testigo los lotes de semillas de proveedores del PRONitens AG. Se medirán a los 6 años, para crecimiento, colapso (a partir de Pilodyn) y rajaduras (a partir de evaluaciones NIR de lignina y de las tensiones longitudinales).

Establecimiento de Ensayos Demostrativos de Ganancias Genéticas

Como complemento a los ensayos de progenie, se establecerá un mínimo de 3 ensayos de ganancia, los cuales incluirán una mezcla de las 20 mejores y de las 10 peores familias del ranking de selección de las 325 familias, una mezcla del escenario A (Línea 1) y las dos mejores madres del escenario B (Línea 2) y un lote comercial. Se incluirán tres espaciamentos: 3 x 3, 4 x 4 y 5 x 5 m en parcelas de 49 árboles y 4 réplicas. Eso corresponderá a una superficie aproximada de 5 hectáreas. Estos ensayos se establecerán en el año 2014.

Detalle de las Ganancias Esperadas en Cada Línea

Como se señaló, en el objetivo de mejoramiento (designado por H) se considerará como variables clave, el volumen, la incidencia de rajadura y la incidencia de colapso. En forma matricial, se puede escribir como:

$$H = a'g$$

Donde: a : es el vector de ponderaciones

g : el vector de los valores genéticos para cada variable (volumen, rajadura y colapso).

Como se mencionó ya, en este caso se considera tener las mismas ponderaciones relativas, donde:

$$H = a'g = [1 \quad 1 \quad 1] \begin{bmatrix} g_{VOL} \\ g_{RAJ} \\ g_{COL} \end{bmatrix}$$

Cuadro N° 2

VECTOR DE PONDERACIONES ECONÓMICAS, HEREDABILIDADES Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA CADA UNA DE LAS VARIABLES DEL OBJETIVO DE MEJORAMIENTO Y DEL CRITERIO DE SELECCIÓN.

Variables	A	h^2	CV (%)
Objetivo			
Volumen	1	0,20	40
Rajadura	1	0,30	50
Colapso	1	0,40	30
Criterio Selección			
DAP		0,20	
Lignina + DRL (NIR)		0,40	
Densidad (Pilodyn)		0,40	

Cuadro N° 3

CORRELACIONES GENÉTICAS APROXIMADAS ENTRE LAS VARIABLES DEL OBJETIVO Y LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN.

Variable	Volumen	Rajadura	Colapso
DAP	0,80	0	0
Lignina + DRL	0	0,60	0
Densidad	0	0	0,40

Los parámetros genéticos necesarios fueron adaptados de la literatura y se simplificó el análisis considerando Volumen, Rajadura y Colapso como variables no correlacionadas entre sí. La información utilizada para estimar los valores de g_i van a variar de acuerdo con las líneas del programa. De modo sencillo, se puede considerar que en cada una de las líneas de selección, se va a tener un índice de selección del tipo general:

$$I = b'y$$

Donde: b es el vector de los coeficientes del índice
 y es el vector de las respectivas informaciones (mediciones del árbol y de sus parientes para los criterios de selección).

Las variables usadas en g y en y más sus respectivos parámetros genéticos están detallados en el Cuadro N° 4.

Cuadro N° 4
ESTRUCTURA DE INFORMACIÓN USADA EN LOS ÍNDICES DE SELECCIÓN
Y LAS RESPECTIVAS VARIABLES DE CADA UNA DE LAS LÍNEAS.

Líneas	Información en el índice			Variables en el índice
	Propio	Hijos	Hermanos	
Línea 1	*	*	*	VOL + DEN
Línea 2	0	8	0	NIR
Línea 3 (Etapa 1)	1	0	20 a 150	DAP+Pil ¹
Línea 3 (Etapa 2)	1	0	0 a 6	NIR

¹Pil = Pilody

Con esta formulación simplificada en índices, la estimación de ganancias esperadas en las distintas líneas de mejoramiento se puede efectuar en base a las ecuaciones clásicas de ganancia genética por índices de selección (White y Hodge, 1989).

$$\Delta G = i\rho_{IH}\sigma_H$$

Donde: i = intensidad de selección

$\rho_{IH} = b'Ca$ es la precisión de selección.

$\sigma_H = \sqrt{a'Ga}$ es la desviación estándar genética del objetivo de mejoramiento H

El valor de la precisión va a depender de la heredabilidad y de las correlaciones entre variables del criterio y objetivo, siendo una medida de la calidad de la selección.

Las ganancias en cada variable se pueden estimar como:

$$\Delta g = i.C'b/(b'Vb)$$

La matriz C deberá incluir las covarianzas genéticas entre las variables en I y H y la matriz V , las variancias-covarianzas genéticas entre las variables en I . Si todas las variables se presentan en unidades de desviación estándar, entonces también estará en esa misma unidad. Lo mismo se presenta en el Cuadro N° 5, junto con algunas estadísticas relativas a la información disponible y la precisión de selección de cada índice. Se recuerda que estas estimaciones de ganancias son aproximaciones, por cuanto la selección estará basada en estimaciones BLUP, que incorporarán toda la información disponible para cada árbol, correctamente ajustada a las distintas clases de factores fijos. Se colocarán también algunas restricciones de parentesco o de calidad de fuste, forma o sanidad lo que podrá afectar las estimaciones finales.

Cuadro N° 5
GANANCIAS ESPERADAS EN LAS VARIABLES DEL OBJETIVO
PARA LAS DISTINTAS LÍNEAS DE DESARROLLO GENÉTICO.

Objetivo	Criterio	Δg_1	Δg_2	$\Delta g_{3.1}$	$\Delta g_{3.2}$
Volumen	DAP	0	0	0,18	0
Rajadura	NIR (Lig+DRL)	0	0,11	0	0,25
Colapso	Den(Pilodyn)	0	0	0,06	0
Fecha		2012	2013	2018	2018
ρ_{IH}			0,27	0,26	0,30
i			2,05	2,05	1,75

Las ganancias asociadas a la Línea 1 (Δg_1) corresponden a semilla colectada en el Huerto HSC1:4, y constituyen el valor de referencia (=ganancia cero). Las ganancias de la Línea 2 (Δg_2) corresponden a semilla colectada en las 2 mejores madres del HSC1:4, y las de la Línea 3 (Δg_3), discriminando en las dos etapas de selección, corresponden a la semilla colectada en el nuevo huerto con las 30 selecciones para calidad de madera. Ganancias expresadas en unidades de desviación estándar para $i=1$.

El Cuadro N° 6 representa los valores de ganancias finales (en términos relativos) para cada una de las líneas de mejoramiento. Se espera que la elección de las 2 mejores madres (de 50 actualmente existentes en el Huerto Semillero Clonal 1:4) genere una ganancia de 11% en el Índice de Rajadura. A su vez, el nuevo huerto semillero para calidad de madera se espera que genere ganancias de un 10% en Rajadura, de 26% en Volumen y de 3% en Colapso.

Cuadro N° 6
GANANCIAS POR VARIABLE DEL OBJETIVO, EN UNIDADES DE DESVIACIÓN
ESTÁNDAR Y EN PORCENTAJE, RESPECTO A LA SEMILLA COLECTADA
EN EL HUERTO 1:4.

Líneas	Ganancias		
	ΔVOL	ΔRAJ	ΔCOL
Línea 1	0	0	0
Línea 2	0	0,23 (11%)	0
Línea 3	0,39 (16%)	0,51 (26%)	0,08 (3%)

NECESIDAD DE INFUSIÓN DE NUEVO MATERIAL

De acuerdo con los estudios comparativos de crecimiento de procedencias nativas de *E. nitens* en Chile, las de la región central del estado Australiano de Victoria (tradicionalmente agrupados en los orígenes de Toorongo, Macalister y Rubicon) probaron ser en general superiores en crecimiento y adaptación a las procedencias del Sur de NSW (Tallaganda y otras localidades cercanas), Errinundra (hoy clasificada especie distinta - *E. denticulata*), o las procedencias del Norte de NSW (Barrington Tops y Mount Ebor).

Se demostró que la productividad de Tallaganda se queda entre 15 a 20% por debajo del material de Victoria Central. Los mismos resultados presentan varios estudios realizados en Australia (Mc Kimm, 1985) y en Sudáfrica (Purnell, 1988). Esta superioridad de Victoria se refiere casi exclusivamente a crecimiento y en menor grado a rectitud y tolerancia al

frio. Respecto a la calidad de la madera, existe poca información disponible. Sin embargo, la densidad parece ser superior en las procedencias del Norte de NSW y en especial de Errinundra (en unos 30 Kg/m³), en comparación con las procedencias de Victoria o de S-NSW (Tallaganda). A su vez, Tallaganda y las demás procedencias del S-NSW parecen tener una densidad parecida (Mc Kimm, 1985; Pereira *et al.*, 1988) o ligeramente inferior (Purnell, 1988) a Victoria Central.

Estas diferencias de densidad son relevantes en lo que respecta a colapsos o grietas internas, y a características como la dureza, pero no están relacionadas con diferencias de tensiones de crecimiento o rajaduras. Al respecto, (Mc Kimm, 1985) demostró que el material procedente de S-NSW (Tallaganda) presentó tensiones de crecimiento significativamente menores que material procedente de Victoria, mientras que estas dos procedencias fueron mucho mejores que el material de N-NSW o de Errinundra.

En otro estudio, que no incluyó las procedencias de Victoria, (Purnell, 1988) confirma que Tallaganda presenta menos rajaduras que las procedencias del N-NSW. Esto es consistente con las conclusiones de (Clarke, 1999), quien detectó que material procedente de Tallaganda presentó un mayor contenido de lignina (y menos celulosa), lo que sería, como se comentó, una indicación indirecta de menores tensiones. Finalmente, (Hamilton *et al.*, 2009) encontraron que dentro del material victoriano, Toorongo y ciertas localidades del sur de Rubicon presentan mayores contenidos de celulosa (0,5% más), lo que indirectamente indicaría mayores tensiones de crecimiento que los restantes orígenes en el norte de Victoria, como Macalister y Connors Plain.

De los antecedentes anteriores se desprende un interés potencial por asegurar que material procedente de Tallaganda (o de la raza *NNSW* como es denominada hoy en día), esté incluido en la sub-población de mejoramiento, de modo de garantizar la infusión de genes de valor para reducir las tensiones de crecimiento. Este tema es relevante en el presente programa, pues el origen Tallaganda, por su lento crecimiento, está muy poco representada en la Población Base de Forestal Mininco S.A. y en general en los huertos semilleros disponibles.

Para mejorar tal representación se propone identificar y seleccionar unas 30 familias de procedencias del Norte de NSW, de modo de complementar los futuros ensayos de progenie (Línea 4).

REFERENCIAS

Bailleres, H.; Chanson, B.; Fournier, M.; Tollier, MT. and Monties, B. 1995. Structure, composition chimique et retraits de maturation du bois chez les clones d'*Eucalyptus*. Annales des Sciences Forestières 52 (2):157-172.

Bailleres, H.; Davrieux, F. and Ham-Pichavant, F. 2002. Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a *Eucalyptus* breeding program. Annals of Forest Science 59:479-490.

Bamber, RK. 1987. The origin of growth stresses: A rebuttal. IAWA Bulletin 8 (1):80-84.

Bamber, RK. 2001. A general theory for the origin of growth stresses in reaction wood: how wood stay upright. IAWA Journal 22 (3):205-212.

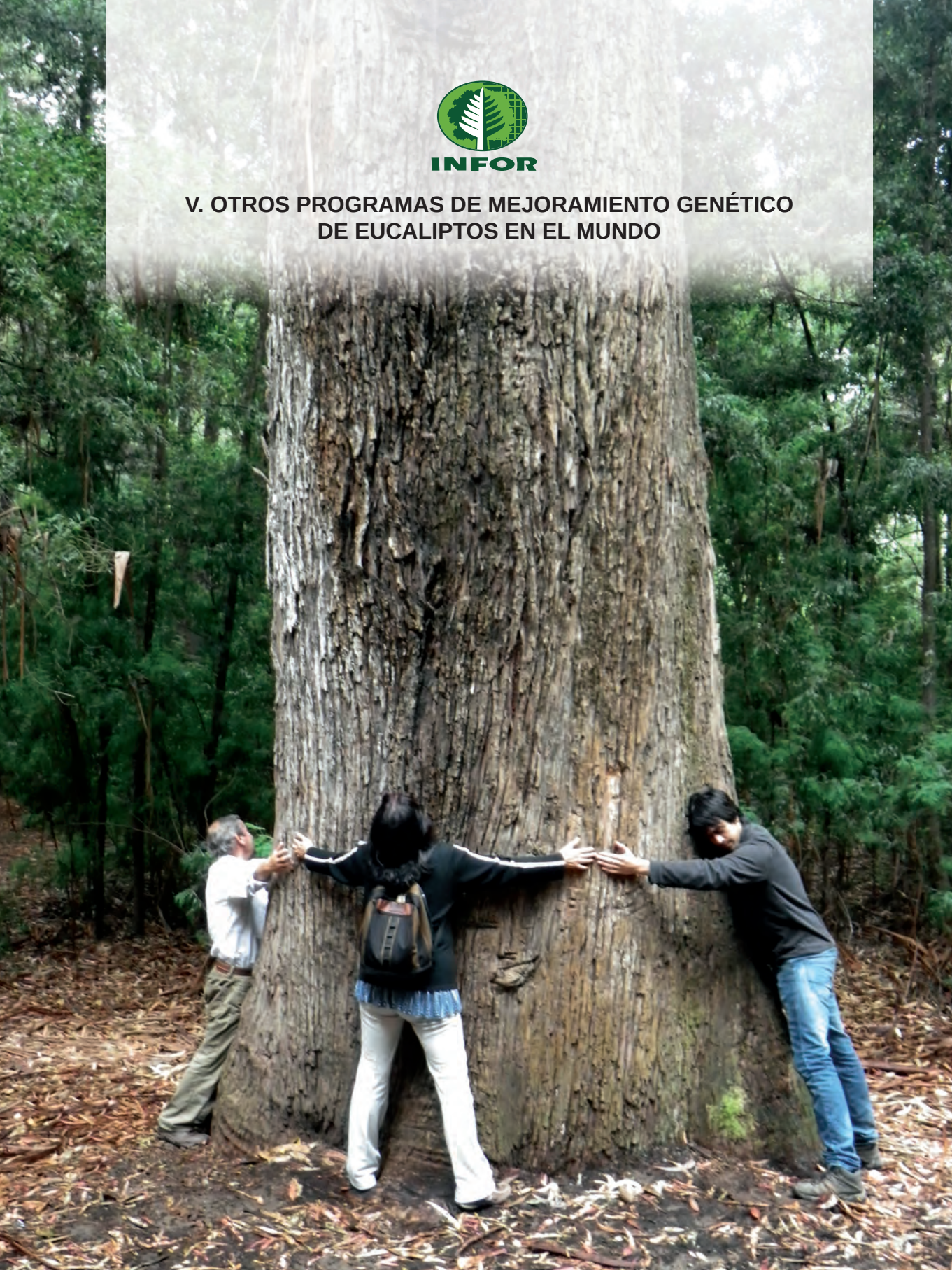
Biechele, T.; Nutto, L. and Becker, G. 2009. Growth strain in *Eucalyptus nitens* at different stages of development. Silva Fennica 43 (4):669-679.

- Chauhan, SS. and Walker, J. 2004.** Relationship between longitudinal growth strain and some wood properties in *Eucalyptus nitens*. *Australian Forestry* 67 (4):254-260.
- Clarke, CRE. 1999.** Wood and pulp properties of four New South Wales provenances of *E. nitens* grown on a warm and a cold site in South Africa. In: *Silvatecna XII Eucalyptus in Chile: Present and Future (Silviculture and Industrial Use)*, Concepcion, Chile, 26-27 August 1999.
- Downes, GM.; Meder, R.; Bond, H.; Ebdon, N.; Hicks, C. and Harwood, C. 2011.** Measurement of cellulose content, Kraft pulp yield and basic density in Eucalypt woodmeal using multisite and multispecies near infra-red spectroscopic calibrations. *Southern Forests* 73 (3-4):181-186.
- Greaves, BL.; Borralho, NMG. and Raymond, CA. 1997.** Breeding objective for plantation Eucalypts grown for production of kraft pulp. *Forest Science* 43:465-472.
- Greaves, BL.; Borralho, NMG.; Raymond, CA. and Farrington, A. 1996.** Use of Pilodyn for the indirect selection of basic density in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research* 26 (9):1643-1650.
- Hamilton, MG.; Potts, BM.; Greaves, BL. and Dutkowski, G. 2010.** Genetic correlations between pulpwood and solid-wood selection and objective traits in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science* 67 (5):511.
- Hamilton, MG.; Raymond, CA.; Harwood, CE. and Potts, BM. 2009.** Genetic variation in *Eucalyptus nitens* pulpwood and wood shrinkage traits. *Tree Genetics & Genomes* 5:307-316.
- Kube, PD. and Raymond, CA. 2005.** Breeding to minimize the effects of collapse in *Eucalyptus nitens* sawn timber. *Forest Genetics* 12 (1):23-34.
- Mc Kimm, RJ. 1985.** Characteristics of the wood of fast-grown trees of *Eucalyptus nitens* Maiden with special reference to provenance variation. I Variation in growth, strain and density associated with provenance. *Australian Forestry Research* 15:207-218.
- Okuyama, T.; Yamamoto, H.; Yoshida, M.; Hattori, Y. and Archer, RR. 1994.** Growth stresses in tension wood: role of microfibrils and lignification. *Annales des Sciences Forestières* 51:291-300.
- Pereira, JCD.; Sturion, JA. and Faber, J. 1988.** Comparação da qualidade da madeira de cinco procedencias de *Eucalyptus nitens* para fins energéticos. *Boletim Pesquisa Florestal* 16:1-6.
- Purnell, RC. 1988.** Variation in wood properties of *Eucalyptus nitens* in a provenance trial of the Eastern Transvaal Highveld in South Africa. *South African Forestry Journal* 144:10-22.
- Raymond, CA. and MacDonald, AC. 1998.** Where to shoot your pilodyn: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forests* 15 (3):205-221.
- Valencia, JC.; Harwood, C.; Washusen, R.; Morrow, A.; Wood, M. and Volker, P. 2011.** Longitudinal growth strain as a log and wood quality predictor for plantation-grown *Eucalyptus nitens* sawlogs. *Wood Science and Technology* 45:15-34.
- Washusen, R.; Harwood, C.; Morrow, A.; Northway, R.; Valencia, JC.; Volker, P.; Wood, M. and Farrell, R. 2009.** Pruned plantation-grown *Eucalyptus nitens*: effects of thinning and conventional processing practices on sawn board quality and recovery. *New Zealand Journal of Forestry Science* 39:39-55.
- White, TL. and Hodge, GR. 1989.** Predicting Breeding Values with Applications in Forest Tree Improvement. *Forestry Sciences*. Kluwer Academic Publishers.
- Yang, JL.; Baillères, H.; Okuyama, T.; Muneri, A. and Downes, GM. 2005.** Measurement methods for longitudinal surface strain in trees: a review. *Australian Forestry* 68 (1):34-43.



INFOR

V. OTROS PROGRAMAS DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS EN EL MUNDO



22. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS DE ZONAS TEMPLADAS EN AUSTRALIA

B. M. Potts¹
M. Hamilton¹
D. J. Pilbeam²

INTRODUCCIÓN

Australia posee 116 millones de hectáreas de bosques nativos de eucaliptos (ABARES, 2011), y además tiene 925 mil hectáreas de bosques plantados de eucaliptos (Gavran, 2012), lo que representa aproximadamente el 5% de las plantaciones globales de eucaliptos (Iglesias-Trabado *et al.*, 2009).

La mayor parte de las plantaciones de eucaliptos en Australia han sido establecidas entre los años 1995 y 2009, expansión que ha sido motivada por esquemas de manejo de inversiones (Gavran y Parsons, 2011) y la mayoría (85%) con fines de producción de pulpa (Gavran, 2012).

La mayor parte de estas plantaciones se encuentran en las regiones templadas del sur de Australia y las principales especies en ellas son *Eucalyptus globulus* Labill. (*Tasmanian Blue Gum*) y *E. nitens* (Deane & Maiden) Maiden (*Shining Gum*) (Cuadro N° 1).

Ambas especies pertenecen al subgénero *Symphyomyrtus*, sección *Maidenaria* (Brooker, 2000) y son el foco de esta revisión, sin embargo, es importante mencionar que hay numerosas otras especies del género *Eucalyptus* que están siendo domesticadas en Australia para diversos propósitos productivos, desde pulpa, madera sólida y aceites, hasta objetivos ambientales, como secuestro de carbono, reducción de salinidad y rehabilitación de áreas afectadas por la minería (Byrne, 1999; Harwood *et al.*, 2007; O'Brien *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2011; Bush, 2011; Bush *et al.*, 2011; Hendrati *et al.*, 2011).

1 School of Plant Science and National Centre of Future Forest Industries, University of Tasmania, Private Bag 55 Hobart, Tasmania 7001 B.M.Potts@utas.edu.au>

2 Southern Tree Breeding Association Inc., PO Box 1811, Mount Gambier, South Australia, 5290, Australia.

Cuadro N° 1
SUPERFICIE PLANTACIONES DE EUCALIPTOS Y OTRAS
LATIFOLIADAS EN AUSTRALIA 2011

Región	<i>E. globulus</i>	<i>E. nitens</i>	Otros Eucaliptos	Otras Especies	Total
	(Miles ha)				
<i>Western Australia</i>	282	0	23	1	306
<i>Green Triangle</i>	170	0	0	0	171
<i>Central Victoria</i>	33	3	2	0	38
<i>Central Gippsland</i>	14	11	8	0	33
<i>Tasmania</i>	20	208	1	6	236
Otras Regiones	20	15	114	46	196
TOTAL (Miles ha)	540	236	149	54	980
(%)	55	24	15	6	100

(Fuente: Gavran, 2012)

Eucalyptus globulus está entre las 10 especies forestales más *plantadas* globalmente (Varmola y Del Lungo, 2003), es la principal especie en plantaciones para pulpa en las regiones templadas (Eldridge *et al.*, 1993; Cotterill *et al.*, 1999; Potts, 2004) y, con 540.000 ha, Australia se ubica entre los principales cultivadores mundiales de la especie (Potts, 2004). La mayor parte de las plantaciones de *Eucalyptus globulus* en Australia se localizan en *Western Australia* (282.000 ha) (Figura N° 1) y la Región de *Green Triangle* (170.000 ha) (Cuadro N° 1), regiones que están fuera del rango de distribución natural de la especie (Barbour *et al.*, 2008).



(Fotos: B. Potts)

Figura N° 1
PLANTACIONES RECIENTEMENTE ESTABLECIDAS DE *Eucalyptus globulus*
(Izq), COSECHA (Centro) Y PLANTA DE ASTILLADO PARA EXPORTACIÓN
(Der) WESTERN AUSTRALIA

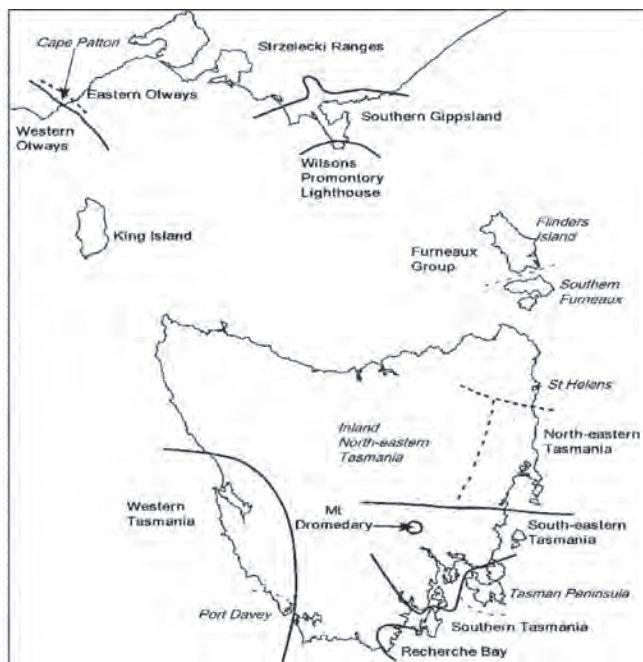
Eucalyptus globulus crece naturalmente en Tasmania, en las islas del estrecho de Bass y en la costa adyacente de Victoria (Jordan *et al.*, 1993; Dutkowski y Potts, 1999; Jones *et al.*, 2012) (Figura N° 2) y es una de las 4 *taxa* estrechamente relacionadas del complejo

de los Blue Gums, denominadas *Eucalyptus globulus*, *E. bicostata*, *E. pseudoglobulus* y *E. maidenii* (Brooker, 2000) o tratadas como subespecies de *E. globulus* (Kirkpatrick, 1974; Pryor y Johnson, 1971).

Las regiones principales de estas 4 *taxa* son morfológica y geográficamente distintas, pero relacionadas por poblaciones intermedias (Kirkpatrick, 1974, 1975a; Jordan *et al.*, 1993; Jones *et al.*, 2012). En este capítulo se considera a tales *taxa* como especies, y a las poblaciones intermedias se les incluye dentro de *E. globulus*. La especie varía genéticamente a través de su distribución geográfica y, en términos amplios, su variación genética cuantitativa en numerosos rasgos se ha resumido clasificando su acervo genético nativo en una jerarquía de 13 razas y 20 sub razas (Figura N° 2). Estudios genéticos moleculares subsecuentes han mostrado que estas razas genéticamente diferenciadas conforman 5 *clusters* principales, comprendiendo:

- a. Poblaciones del continente, de *Strezlecki Ranges* y *South Gippsland*
- b. Poblaciones del continente, de *Otway Ranges*
- c. *King Island* y *Western Tasmania*
- d. Poblaciones de *Eastern Tasmania*
- e. *Furneaux Islands* (Yeoh *et al.*, 2012)

Estos *clusters* pueden ser resumidos en 3 linajes principales; a+b; c y d+e (Jones *et al.*, 2006; Steane *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2012).



(Modificado de Dutkowski y Potts, 1999)

Figura N° 2.
DISTRIBUCIÓN NATURAL Y CLASIFICACIÓN DE RAZAS DE *Eucalyptus globulus*

Eucalyptus nitens es la segunda especie del género más plantada en Australia (236.000 ha) (Cuadro N° 1) y, aunque menos ampliamente plantada que *E. globulus*, es considerada como una de las principales especies de eucaliptos para plantaciones industriales en el mundo (Harwood, 2011), con plantaciones principalmente en Australia y en Chile.

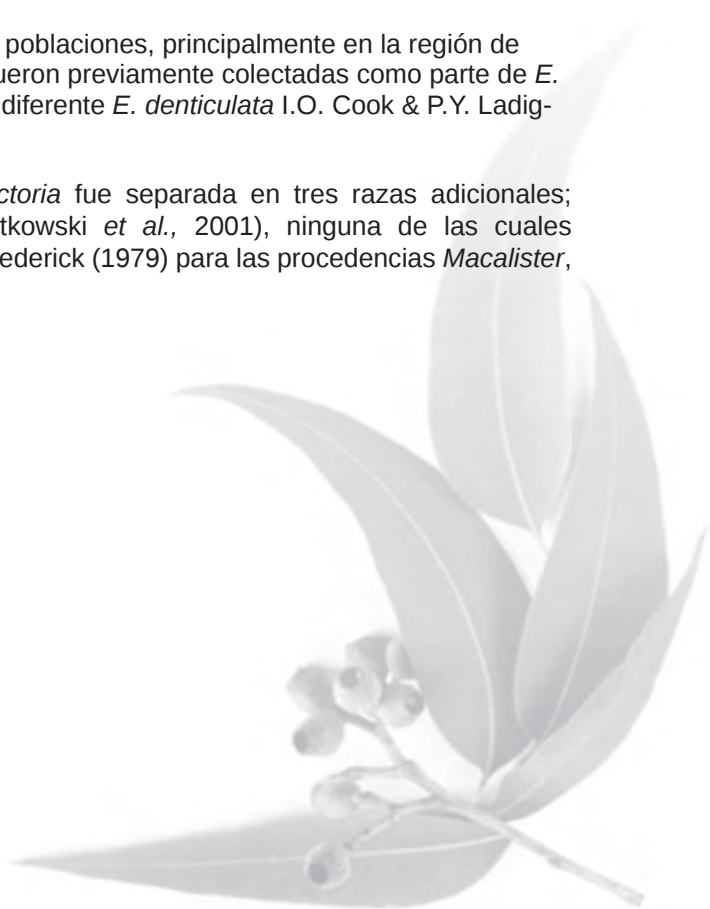
En Australia, Chile, Sudáfrica y Nueva Zelanda se están desarrollando trabajos de mejoramiento genético con esta especie (Hamilton y Potts, 2008). En Australia, *E. nitens* es cultivado principalmente en *Tasmania* (Cuadro N° 1), en regiones donde las bajas temperaturas (Tibbits y Hodge, 2003) o el ataque de *Teratosphaeria*, antes *Mycosphaerella* (Mohammed et al., 2003), a las hojas limitan la supervivencia y el crecimiento de *E. globulus* (Cuadro N° 2).

Eucalyptus nitens es cultivado principalmente para producción de pulpa (Figura N° 3), aunque *Forestry Tasmania* maneja un patrimonio de la especie, bajo raleos y podas, de 20.000 ha para productos de madera sólida (Wood et al., 2009) (Figura N° 4).

Eucalyptus nitens tiene una distribución natural dispersa (Figura N° 5), que se extiende a través de un amplio rango latitudinal que abarca desde las *Central Highlands* de *Victoria* hasta el área de *Dorrigo* en *New South Wales* (Boland et al., 1992; Chippendale, 1988). Cook y Ladiges (1991) separan la especie en tres razas genéticas distintas:

- a. *Central and Northern NSW*
- b. *Southern NSW and Mt. Kaye*
- c. *Central Victoria* (separando también poblaciones, principalmente en la región de *Errinundra* en *Victoria* que aunque fueron previamente colectadas como parte de *E. nitens*, corresponden a una especie diferente *E. denticulata* I.O. Cook & P.Y. Ladiges).

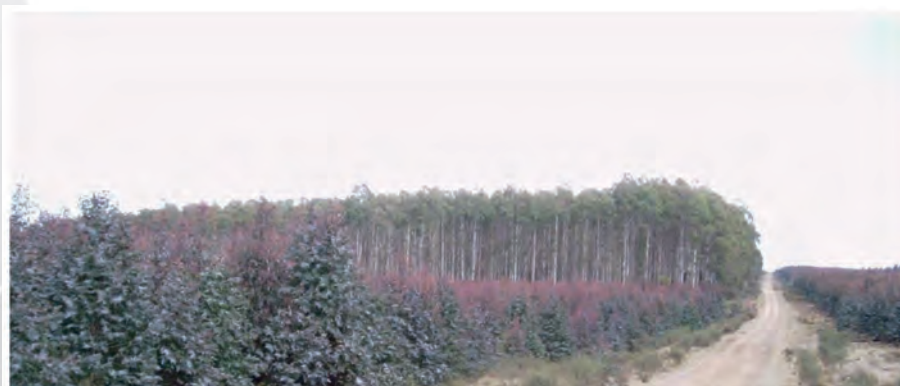
Posteriormente, la raza *Central Victoria* fue separada en tres razas adicionales; *Northern*, *Southern* y *Connor's Plain* (Dutkowski et al., 2001), ninguna de las cuales corresponde claramente con los límites de Pederick (1979) para las procedencias *Macalister*, *Rubicon* o *Toorongo* (Figura N° 5).



Cuadro N° 2
CARACTERÍSTICAS QUE FAVORECEN LA PLANTACIÓN
DE *E. nitens* O *E. globulus* EN TASMANIA

<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Eucalyptus nitens</i>
Adaptación	
Más resistente a sequía Mayor eficiencia en el uso del agua Más resistente a <i>Phytophthora cinnamomi</i> Menos susceptible a deficiencia de cobre	Generalmente más rápida ocupación del sitio Gran Resistencia a heladas y a frío Menos susceptible a polillas que provocan la esqueletización de las hojas en los <i>gum</i> Gran resistencia a defoliación por <i>Teratosphaeria</i>
Aptitud para Pulpa y Papel	
Generalmente gran rendimiento en pulpa kraft Mayor densidad básica de la madera	
Aptitud para Madera Sólida, Chapas y Compuestos	
Menos grietas internas en la madera aserrada Gran resistencia, rigidez y dureza de la madera Mejor desprendimiento de ramas muertas	Menor propensión a formación de tensiones en la madera y los defectos asociados en el secado Mejor rectitud del fuste en edad temprana
Reproducción y Propagación	
Fácil y rápido crecimiento en viveros en contenedores (semilla más grande, fácil de sembrar y se obtienen plantas más grandes en tiempos más cortos) Vigoroso rebrote de tocones Más fácil de polinizar artificialmente, pero muestra incompatibilidad unilateral con taxa con flores más pequeñas Puede ser polinizada masivamente para propagación. Fácil de propagar por estacas leñosas	Fácil de injertar y menor incompatibilidad de injerto Huertos semilleros de polinización abierta fáciles de manejar. Más flores y semillas por árbol o por hectárea Más superposición en período de floración

(Fuente: Potts *et al.*, 2011)



(Foto: B. Potts)

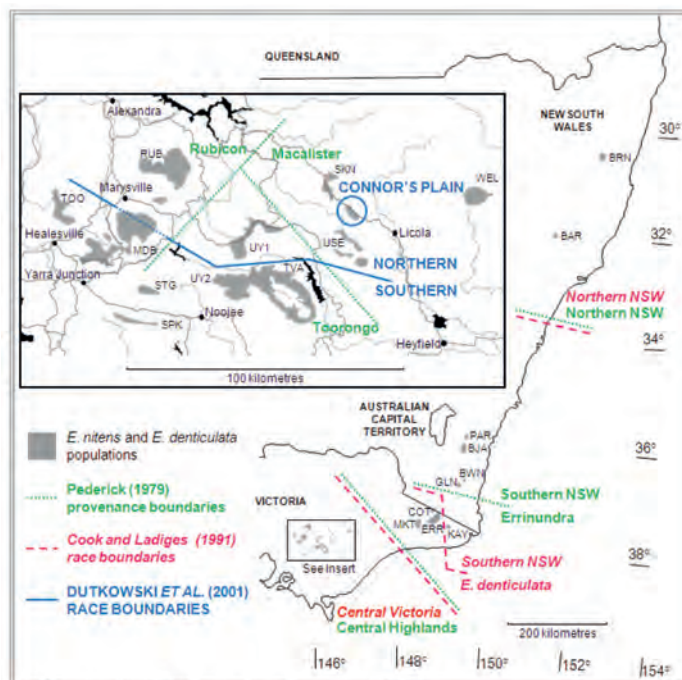
Figura N° 3.
PLANTACIONES DE *Eucalyptus nitens* EN NORTH-WESTERN TASMANIA
MANEJADAS PARA PRODUCCIÓN DE PULPA



(Foto: M. Hamilton)

Plantación manejada para producción de madera sólida. Plantada a 1,333 árboles por hectárea, podada a 6,4 m de altura a los 6 años y raleada a los 10 años, para cosecha esperada a los 25 años.

Figura N° 4
PLANTACIÓN RALEADA Y PODADA DE 21 AÑOS DE *Eucalyptus nitens* EN TASMANIA



(Fuente: Modificado de Hamilton et al., 2008).

Figura N° 5
DISTRIBUCIÓN NATURAL DE *Eucalyptus nitens* Y LÍMITES ENTRE RAZAS

MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LAS PRINCIPALES ESPECIES

Revisiones previas sobre el mejoramiento genético de *Eucalyptus globulus* y *E. nitens* en el mundo incluyeron las actividades en Australia (Eldridge *et al.*, 1993; Tibbits *et al.*, 1997; Potts *et al.*, 2004; Potts *et al.*, 2011). Los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus nitens* en Australia han sido recientemente revisados por Hamilton *et al.* (2008), su variación racial por Hamilton *et al.* (2011a) y los parámetros genéticos por Hamilton y Potts (2008).

Se revisa esta información y también se entrega una visión resumida de los principales programas de mejoramiento genético en Australia. A fines de los años 80 y principios de los años 90 se exploró estrategias de hibridación interespecífica con estas especies (Potts y Dungey, 2004; Tibbits, 2000; Volker *et al.*, 2008; Costa e Silva *et al.*, 2012), pero esta alternativa fue abandonada a mitad de los años 90 debido a consideraciones económicas y desde entonces los programas australianos de mejoramiento para ambas especies se han enfocado en el mejoramiento de poblaciones de especies puras.

En forma similar, la macro y micropropagación vegetativa fue extensamente explorada como una estrategia de propagación durante ese período (de Little, 2004). Se encontró que *E. globulus* es más fácil de propagar en forma vegetativa que *E. nitens* (de Little, 2004) y se estableció algunos ensayos clonales de ambas especies (Stackpole *et al.*, 2010a; Costa e Silva *et al.*, 2013b). Sin embargo, dado el escaso éxito obtenido con el enraizamiento de *E. nitens* y atendiendo a los mayores costos de los clones en general, en la actualidad las plantas de semillas constituyen el principal sistema de propagación usado para ambas especies en Australia (Potts *et al.*, 2008; Hamilton *et al.*, 2008).

Objetivos del Mejoramiento

En Australia ambas especies se cultivan principalmente para producción de pulpa y gran parte de la madera se exporta como astillas a Japón, China y Corea. La modelación bioeconómica identifica al volumen por hectárea, la densidad de la madera y los rendimientos de pulpa como las características objetivo claves para empresas verticalmente integradas en la producción de pulpa Kraft de eucaliptos (Greaves *et al.*, 1996a; Dutkowski *et al.*, 2000; Dutkowski *et al.*, 2007). Pocas empresas forestales australianas tienen ya esa integración vertical y pueden modelar sus objetivos de mejoramiento como tales, otras tienen objetivos que llegan solo hasta la exportación de astillas. Estas otras empresas no dan importancia económica al rendimiento en pulpa, por cuanto este rendimiento no es retribuido cuando se comercializan astillas (Whitlock *et al.*, 2007). Sin embargo, esta característica puede llegar a ser un importante aspecto de entrada a los mercados en el futuro.

No obstante, en Australia, donde el mejoramiento de *E. nitens* y *E. globulus* puede implicar evaluación conjunta (McRae *et al.*, 2004a; Hamilton *et al.*, 2008) o mejoramiento cooperativo (Ej. a través de *Southern Tree Breeding Association* =STBA) (McRae *et al.*, 2004b), las diferencias de objetivos entre quienes cultivan eucaliptos, incluyendo objetivos secundarios, son aplicadas más frecuentemente a la propagación. La correlación entre la selección bajo objetivos de mejoramiento para producción de pulpa y otra que integra ingresos por comercialización de carbono en los mercados de este elemento ha sido estimada en 0,93 (Whitlock *et al.*, 2007).

Si bien existe un creciente interés en utilizar *Eucalyptus globulus* y *E. nitens* para la generación de madera y productos de ingeniería en madera en Australia (Washusen *et al.*, 2009; Potts *et al.*, 2011; Blackburn *et al.*, 2012), es problemático definir los objetivos del mejoramiento y su peso económico, debido a: (i) la falta de industrias establecidas en el país para procesar madera sólida de plantaciones de eucaliptos; (ii) la variedad de productos (madera aserrada, chapas, residuos), regímenes silviculturales, sistemas de procesamiento y valor de los productos que deben ser considerados; y (iii) las mayores rotaciones que requieren estos productos y la incertidumbre asociada a las mismas (Potts *et al.* 2011).

Frente a las dificultades indicadas, quienes cultivan eucaliptos para madera sólida tienen que enfocarse, al menos inicialmente, en aspectos genéricos (adaptabilidad, forma, etc.), aun cuando se reconoce que son numerosas las propiedades de la madera que afectan la recuperación y el valor de la madera aserrada, las chapas y los productos compuestos (Raymond, 2002; Potts *et al.*, 2011). Los cambios en las propiedades de la madera pueden impactar sobre múltiples productos en forma favorable o adversa. Por ejemplo, un incremento en la densidad de la madera será probablemente favorable para múltiples tipos de productos, al menos en *E. nitens* (Kube y Raymond, 2005; Blackburn *et al.*, 2012).

El rendimiento de la trozas en el procesamiento para madera sólida depende fuertemente de la silvicultura (Washusen, 2004; Nolan *et al.*, 2005; Beadle *et al.*, 2008). Sin embargo, pocos son en Australia los ensayos genéticos con *E. globulus* y *E. nitens* bajo regímenes silviculturales para madera sólida (raleos y podas) (Blackburn *et al.*, 2013). Esto ha limitado la mayoría de los ensayos genéticos de características potenciales de madera sólida a parcelas de reducido espaciamiento, sin raleos (Hamilton *et al.*, 2007; Hamilton *et al.*, 2010; Blackburn *et al.*, 2010; Blackburn *et al.*, 2011), lo que incrementa las posibles ocurrencias de interacciones genéticas para algunas características, dependiendo de los tratamientos silvícolas aplicados (Ej. contracciones y colapso) (Hamilton *et al.*, 2009).

En tanto que las características que afectan el rendimiento de las trozas para determinados sistemas de procesamiento (supervivencia, tasa de crecimiento, bifurcaciones, rectitud, tamaño de las ramas, conicidad) están usualmente bajo algún grado de control genético (Hamilton y Potts, 2008; Callister *et al.*, 2011; Blackburn *et al.*, 2010; Blackburn *et al.*, 2013), su impacto en la rentabilidad depende en parte de si los efectos genéticos adversos son aminorados a través de los tratamientos silviculturales usuales como raleos y podas. Estudios australianos han mostrado que el rendimiento en verde, los defectos del secado y el valor de los productos desde las trozas están a su vez afectados por las propiedades de la madera, muchas de las cuales se sabe que están bajo algún control genético (Kube y Raymond, 2005; Greaves *et al.*, 2004b; Hamilton *et al.*, 2007; Hamilton *et al.*, 2009; Hamilton *et al.*, 2010; Blackburn *et al.*, 2010; Blackburn *et al.*, 2011) y, en consecuencia, son susceptibles de mejoramiento genético.

Consideraciones Biológicas

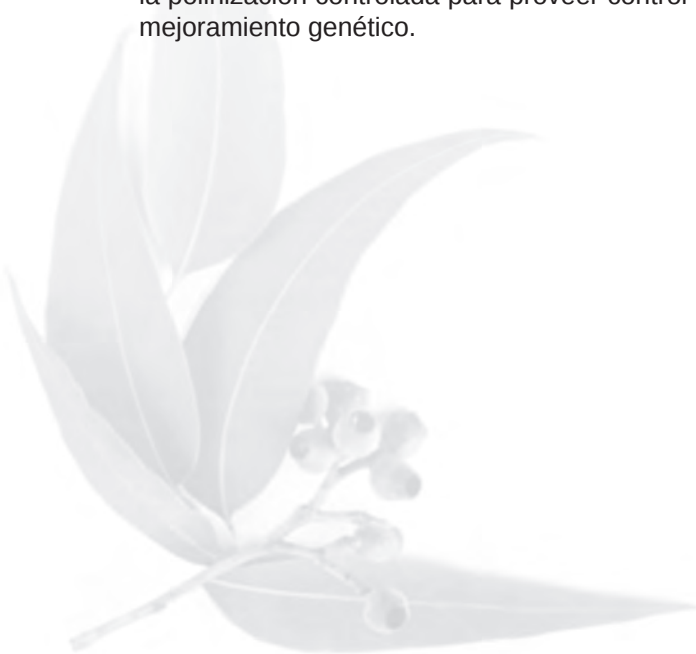
En Australia ha habido una cantidad de trabajos respecto de la biología y genética de *Eucalyptus globulus* y *E. nitens* empleando ensayos que han sido una ayuda para guiar las estrategias de mejoramiento y propagación.

Hay diferencias en su biología reproductiva, en su potencial para propagación vegetativa y en las opciones silvícolas. Por ejemplo, *E. globulus* rebrota bien desde los

tocones (Whittock *et al.*, 2004) y muchas plantaciones en Australia son manejadas como monte bajo (Whittock *et al.*, 2004; Drake *et al.*, 2012). Sin embargo, el incremento del manejo en monte bajo puede ser transitorio y originado en inestabilidades financieras dadas por los mercados actuales. Esta opción silvicultural no está disponible para *E. nitens* que no rebrota tan vigorosamente y las plantaciones son normalmente reestablecidas empleando plantas (Hamilton *et al.*, 2008).

Se ha desarrollado estudios sobre la biología reproductiva de estas dos especies para optimizar su mejoramiento y propagación (Potts *et al.*, 2008; Hamilton, 2008). Como la mayoría de los eucaliptos, *E. globulus* y *E. nitens* son polinizados por animales, pero el tipo y eficiencia de los polinizadores puede variar (Hingston, 2004; Hingston *et al.*, 2004b; Hingston *et al.*, 2004a). Ambas especies, *E. globulus* y *E. nitens*, tienen sistema de cruzamiento mixto, pero general y preferentemente de polinización cruzada (*outcrossing*). Mientras que el promedio de semillas originadas de autopolinización es reducido comparado con el de semillas provenientes de polinización cruzada sin parentesco, la semilla de polinización abierta colectada de rodales nativos y de árboles de huertos semilleros todavía contiene proporciones significativas de semilla de autopolinización. Estimaciones de polinización cruzada en poblaciones nativas de *E. globulus* indican un rango de 65 a 89% (Mimura *et al.*, 2009) y en huertos semilleros de 60 a 92% (Potts *et al.*, 2008). Para *E. nitens* solo se han publicado estimaciones de tasas de cruzamiento exogámico en huertos semilleros y oscilan entre 75 y 87% (Grosser *et al.*, 2010).

Ambas especies exhiben una severa depresión endogámica para supervivencia y crecimiento (Hardner y Tibbits, 1998; Costa e Silva *et al.*, 2010b; Costa e Silva *et al.*, 2010a; Costa e Silva *et al.*, 2011). Como virtualmente todas las plantaciones de *E. globulus* y *E. nitens* en Australia son establecidas usando plantas de semillas, minimizar los niveles de autopolinización ha sido un importante objetivo. El costo de la polinización artificial en *E. globulus* se ha reducido considerablemente como consecuencia del uso de las técnicas de corte de estilo y de polinización en una visita (*single-visit pollination*, SVP) (Williams *et al.*, 1999) (*one-stop pollination*, OSP) (Harbard *et al.*, 1999) que han permitido un mayor uso de la polinización controlada para proveer control completo de pedigrí (Figura N° 6) y facilitar el mejoramiento genético.





(Fotos: D. Pilbeam)

Las técnicas usadas para aislar flores de *E. globulus* incluyen el uso de bolsas sobre toda la rama y también el uso de tubos para aislar individualmente los estilos. En el ejemplo, el globo se aplica rápidamente sobre la flor emasculada y polinizada (izq) mediante un contenedor vacío de película fotográfica (der). Los globos se degradan con el tiempo por lo que no es necesaria otra visita para removerlos.

Figura N° 6

POLINIZACIÓN MEDIANTE CORTE DE ESTILO EN *Eucalyptus globulus*

MOSTRANDO EL USO DE GLOBOS PARA AISLAR EL ESTILO DE FLORES INDIVIDUALES PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN DESPUÉS DE LA EMASCULACIÓN Y POLINIZACIÓN MANUAL DEL ESTILO CORTADO

Estas prácticas han permitido también el desarrollo de técnicas polinización manual (Ej. Polinización Suplementaria Masiva – *Mass Supplementary Pollination, MSP*) para producción de semilla en gran escala para minimizar autopolinización y para permitir la propagación de familias o mezclas de familias elites de medios hermanos o hermanos completos (Potts *et al.*, 2008).

Aún después de numerosos intentos, la técnica de corte de estilos en *E. nitens* no ha sido exitosa (Williams *et al.* 1999), haciendo relativamente costosa la polinización controlada en la especie. En tanto que la semilla mejorada de *E. globulus* en Australia se produce por polinización abierta (*Open-pollinated, OP*) en huertos semilleros clonales y de plantas, tanto como por polinización controlada vía MSP (Potts *et al.*, 2008), esta última opción no es factible para *E. nitens* (Hamilton *et al.*, 2008).

MEJORAMIENTO DE *Eucalyptus globulus*

Antecedentes

Las principales actividades de mejoramiento de *E. globulus* en Australia hasta fines de los años 80 se encuentran compiladas en Eldridge *et al.* (1993), y hasta mediados de los 90 en Tibbits *et al.* (1997).

El mejoramiento formal se inicia en *APM Forests* (actualmente *Hancock Victorian Plantations Pty. Ltd.*) mediante el establecimiento de un ensayo de 18 procedencias (principalmente de *Tasmania*) en *Victoria* a partir de semillas colectadas por T.G. Walduck in

1971 (Eldridge *et al.*, 1993). En 1973, se completó un extensivo estudio de la variación natural del complejo (Kirkpatrick, 1975a; Kirkpatrick, 1975b), seguido en 1975-1976 por la primera colección de semillas para ensayos de procedencias y progenies, que abarcó todo el rango de distribución de rodales nativos y que fue realizado por la *Tasmanian Forestry Commission* (Orme Collection) (Orme, 1977).

Los árboles cortados durante esta colecta de semillas fueron sometidos a pulpaje, mediante el proceso de soda, para estudiar diferencias fenotípicas entre las procedencias (Turner *et al.*, 1983). La colección Orme abarcó procedencias para las cuatro especies del Complejo y, entre 1977 y 1980, fue plantada en más de 20 ensayos de procedencias o familias en Australia, Colombia, Portugal, España, Uruguay y Estados Unidos (Orme, 1988; Eldridge *et al.*, 1993; Almeida *et al.*, 1995; Kube *et al.*, 1995; Volker y Orme, 1988).

En Australia, cinco ensayos de procedencia fueron plantados por la *Tasmanian Forestry Commission* (ahora *Forestry Tasmania*) en 1978-1979 (Volker y Orme, 1988). Dos ensayos de familias fueron establecidos por APPM (después *North Eucalypt Technologies*, entonces *Gunns Ltd*) en el NW de *Tasmania*, uno de ellos (*Woolnorth*) fue posteriormente raleado sobre la base del crecimiento, densidad de la madera y rendimiento en pulpa (Dean *et al.*, 1990; Volker *et al.*, 1990) y llegó a ser una importante fuente de semillas. En *Western Australia*, el *Conservation and Land Management Department* (CALM) plantó dos ensayos de procedencias en 1980 y dos de familias en 1985 (Butcher, 1986; Barbour y Butcher, 1996). En *Victoria*, *APM Forests* plantó 28 procedencias de esa colección en 1986 (Whiteman y Cameron, 1989; Whiteman *et al.*, 1996). Para fines de los años 80, información sobre crecimiento de los ensayos de la colección Orme en Australia y en el extranjero han orientado claramente a los mejoradores de *E. globulus* en zonas templadas (resultados revisados en Eldridge *et al.*, 1993). Ninguna procedencia fue consistentemente destacada, aunque algunas (King Island, Geeveston, Channel y Otways) estaban sobre la media para crecimiento en varios ensayos (Eldridge *et al.*, 1993; Kube *et al.*, 1995).

Ante un creciente interés mundial por el mejoramiento de *E. globulus* para establecer plantaciones destinadas a la producción de pulpa, el Centro de Semillas Australiano (*Australian Tree Seed Centre*, ATSC - CSIRO³) realizó en 1987 y 1988 la mayor colección de semillas desde rodales nativos y poblaciones intermedias de esta especie. Tal colección fue iniciada y financiada por empresas australianas y de otros países y comprendió 616 árboles padres de 49 localidades (Gardiner y Crawford, 1987; 1988; Jordan *et al.*, 1993; Dutkowski y Potts, 1999). Aunque el estudio de los ensayos de la colección Orme continuó en los años 90 (Volker *et al.*, 1990; Almeida *et al.*, 1995; Kube *et al.*, 1995), particularmente para propiedades de la madera (Miranda y Pereira, 2002), el principal interés de los programas de mejoramiento pronto cambió hacia la nueva colección. Esta fue plantada como lotes de familias en más de 50 ensayos de progenie en el mundo, incluyendo Australia (Jarvis *et al.*, 1995), Chile (Sanhueza y Griffin, 2001; Infante y Prado, 1989; 1991; Ipinza *et al.*, 1994), China (Zang *et al.*, 1995), Ethiopia (Hunde *et al.*, 2007), Portugal (Araújo *et al.*, 1996) y España (Vega Alonso *et al.*, 1994; Soria y Borralho, 1998; Toro *et al.*, 1998), y conformó la población base (Jarvis y Borralho, 1995) o una importante población de infusión (Griffin, 2001) para muchos programas de mejoramiento.

3 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia)

Posteriormente se han realizado otras colecciones menores en rodales nativos, a menudo con orientaciones más específicas. Por ejemplo, lotes adicionales de semillas fueron colectados por CSIRO en 1990; 44 lotes de semillas de fenotipos tolerantes a la salinidad fueron colectados por ALCOA en SE Tasmania en 1991; 400 árboles fueron colectados por A.E. O'Connor en 1992 desde localidades de buena respuesta en ensayos anteriores (*Otway Ranges*, *Strezlecki Ranges* y *Gippsland*); 82 lotes de semillas fueron colectados en *King Island* por C. Jessopen 1992; y *Kylisa Seeds Pty Ltd* efectuó una colecta en todo el rango, de 222 lotes de semillas en 1993-1994 (Lopez *et al.*, 2001). Las colecciones de semillas descritas forman la población base (primera generación desde el estado silvestre) de los programas de mejoramiento genético de *E. globulus* en Australia. Sin embargo, este material ha sido suplementado por selecciones de programas de mejoramiento en el extranjero que han sido llevados de vuelta a Australia para ensayos e infusiones (Callister *et al.*, 2011; Callister *et al.*, 2012).

La organización que maneja el mejoramiento de *E. globulus* en Australia ha sufrido importantes cambios en su estructura corporativa en los años 90, con numerosos cambios en el nombre corporativo a través de reestructuraciones, retiros y giros hacia cooperativa en oposición a mejoramiento interno. Un cambio clave en el período ha sido el reenfoque desde programas de mejoramiento estrechamente ligados con compañías verticalmente integradas, que manejan la producción de madera para sus propias instalaciones de pulpa o papel en los años 80 (Ej. *APPM* y *APM Forests*), hacia productores que son empresas independientes, a menudo manejando patrimonios para esquemas de inversión y proveedores de astillas en el mercado internacional.

Los programas de mejoramiento de *E. globulus* australianos exhiben diversas estrategias y niveles de inversión y están orientados al mejoramiento de las poblaciones, tanto en el largo como en el corto plazo. Las principales organizaciones que desarrollan mejoramiento genético a nivel poblacional en Australia son:

- *Southern Tree Breeding Association (STBA)* que desarrolla el Programa Nacional de Mejoramiento de *E. globulus* (detalles más adelante).
- *WA Forest Products Commission (FPC)*, actualmente inactiva, que promovía su germoplasma selecto bajo el nombre de *Western Blue Gum* (Barbour y Butcher, 1996; Barbour, 1997; Butcher, 1990)
- *Australian Bluegum Plantations PtyLtd*, que adquirió el *Elders Forestry Program*, iniciado por *Integrated Tree Cropping (ITC)* y basado en la colección de semillas de O'Connor más introducciones californianas (Callister y Collins 2007; Collins y Callister 2010; ver Callister *et al.*, 2012 para predicciones de ganancias genéticas).

Hancock Victorian Plantations Pty. Ltd (HVP) adquirió la amplia base de ensayos de *E. globulus* establecida en *Gippsland* por la anterior *APM Forests Pty. Ltd* (Whiteman y Cameron, 1989; Woolaston *et al.*, 1991; Whiteman *et al.*, 1996), la que ahora se encuentra focalizada mayoritariamente en el mejoramiento y evaluación para su uso productivo.

Programa Nacional Australiano de Mejoramiento de *Eucalyptus globulus*

La *Southern Tree Breeding Association (STBA)* conduce el Programa Nacional de Mejoramiento de *E. globulus* y es la responsable del mejoramiento en el largo plazo de las

poblaciones de esta especie en Australia (Mc Rae *et al.*, 2001) (<http://www.stba.com.au/index.html>). La mayoría de las plantaciones miembros se orientan principalmente a la producción de astillas de exportación para la manufactura de pulpa kraft y productos de papel. La formación del Programa de mejoramiento de *E. globulus* de STBA amalgama los recursos genéticos de 8 miembros, incluyendo aquellos de *Forestry Tasmania*, *Gunns Ltd*, *Western Australia Plantation Resources* y *Hancock Victorian Plantations*.

La base consolidada de recursos genéticos a disposición de STBA para propósitos de mejoramiento es amplia y comprende actualmente más de 1.200 familias de polinización abierta dispuestas en 84 ensayos de población base distribuidos en *Southern Australia* (ensayos que constituyen primera generación desde el estado silvestre. Ensayos G1), más 16 ensayos de investigación que están también incluidos en evaluaciones genéticas globales (Cuadro N° 3).

Cuadro N° 3
RECURSOS GENÉTICO DE STBA, POBLACIÓN DE
MEJORAMIENTO DE *Eucalyptus globulus*¹

Raza	Padres Base en Poblaciones Silvestres (G0)	Población Base Ensayos de Progenie (G1)	Padres Base (G0) Representados en los Ensayos Fundadores de la Población de Mejoramiento (G2)
<i>Eucalyptus maidenii</i>	3	462	
<i>Eucalyptus bicostata</i>	3	476	
<i>Eucalyptus pseudoglobulus</i>			
East Gippsland	33	4.155	
Glenmaggie	8	477	
Lerderderg	15	1.035	
<i>Eucalyptus globulus</i>			
(i) Victoria			
Strzelecki Ranges	144	26.815	28
Southern Gippsland	84	8.634	
Eastern Otways	112	13.995	8
Western Otways	206	35.989	24
Wilsons Promontory Lighthouse	13	3.713	
(ii) King Island and Western Tasmania			
King Island	101	13.651	8
Western Tasmania	53	8.891	
(iii) Eastern Tasmania and the Furneaux Islands			
Furneaux	189	28.262	26
North-eastern Tasmania	63	11.370	2
South-eastern Tasmania	117	18.750	15
Mt Dromedary	4	807	
Southern Tasmania	88	10.453	10
Recherche Bay	9	1.148	
Total	1.245	189.083	121

¹La clasificación racial sigue lo indicado en la Figura N° 2, con varias adiciones para cubrir recursos de poblaciones con afinidades morfológicas con *E. pseudoglobulus* (East Gippsland, Glenmaggie y Lerderderg) (Jordan *et al.*, 1993).

Las razas están agrupadas de acuerdo a los linajes más importantes identificados por Steane *et al.* (2006).

El número de progenitores fundadores de la base se refiere a aquellos que están actualmente representados en los ensayos de progenies de hermanos completos establecidos de la primera generación de mejoramiento de 2003 (G2).

Aproximadamente 82.000 árboles fueron plantados en los ensayos de progenie G2 y los primeros de G3 fueron desarrollados en 2007.

Muchos de estos ensayos de poblaciones base se sobreponen con aquellos de los programas de *FPC* e *ITC* y la mayoría han sido cortados o convertidos en huertos semilleros de polinización abierta. La base de progenitores de *STBA* (G0) comprende árboles silvestres muestreados en la colección Orme de 1975-1976 (86 árboles), al igual que virtualmente todos los árboles silvestres muestreados en la colección de CSIRO en 1987-1988 (616) y la colección de O'Connor de 1992 (400).

La mayoría de los ensayos establecidos en Australia y en el extranjero usando la colección de CSIRO de 1987-1988 contenían solo uno de estos dos años de la colecta de polinización abierta. Un recurso clave del programa fueron los 5 ensayos de poblaciones de amplia base de *Gunns Ltd*, los cuales combinaron lotes de semillas de ambos años y fueron intensivamente estudiados (Potts *et al.*, 2004; Costa e Silva *et al.*, 2006; Stackpole *et al.*, 2010b; Stackpole *et al.*, 2010c; Stackpole *et al.*, 2011), al igual que los nuevos ensayos establecidos por *Forestry Tasmania* (Hamilton *et al.*, 2011b; Hamilton *et al.*, 2012). Los ensayos de población base de progenies (G1) comprendieron 189.083 progenies de polinización abierta de 1.239 árboles de *E. globulus* y poblaciones intermedias en estado silvestre (G0) (Cuadro N° 3), excluyendo *E. bicostata* y *E. maidenii*.

Más de 300 progenitores fueron inicialmente seleccionados desde esos ensayos G1. A un sub conjunto de esas selecciones se le ha tomado la huella mediante marcadores microsatelitales y han mostrado ser genéticamente diversos, con niveles ligeramente altos en heterocigosidad, que los árboles en estado silvestre (Jones *et al.*, 2006).

STBA hace cruzamientos anuales y ha hecho más de 2.500 cruzamientos biparentales desde 1995, de los cuales 76% corresponde a cruzamientos inter razas.

Pruebas de progenies (55), totalizando 82.214 árboles y 1.466 familias de hermanos completos han sido ahora establecidas en *Southern Australia* desde la primera generación de mejoramiento (2° generación desde los árboles silvestres muestreados, G2). Estas familias incluyen cruzamientos entre 203 padres de 1° generación (G1) y 28 progenitores silvestres (G0), que en total representan 121 árboles G0 de diversas razas nativas, pero que la mayoría son de *Strezlecki Ranges*, *Otways Region* y *Furneaux Islands* (Cuadro N° 3).

Se han hecho selecciones en los primeros ensayos G2; los primeros cruzamientos de 3° generación, de 11 progenitores G2, fueron cosechados en 2006 e incluido en los ensayos más recientes, los que todavía son predominantemente G2.

Los recursos genéticos G2 incluyen una importante serie de ensayos con un esquema de cruzamiento dialelo 30 x 30 incompleto, el cual fue establecido en Australia entre 2007 y 2009, en colaboración con la Universidad de Tasmania. El más grande de estos ensayos es detallado por Costa e Silva *et al.* (2013a).

- Estrategia

STBA ha adoptado un plan de trabajo de *rolling front* con generaciones solapadas (Borralho y Dutkowski, 1998). Las evaluaciones genéticas son desarrolladas anualmente en la población completa, para regularmente incorporar nuevos individuos y nuevas evaluaciones de datos, de modo tal de mejorar las estimaciones de valores de mejoramiento y propagación. El intervalo mínimo de generación para actividades de mejoramiento se estima

en aproximadamente 8 años. El objetivo primario del mejoramiento apunta a maximizar la rentabilidad de plantaciones para producción de pulpa kraft (VPN/ha), considerando actualmente volumen de cosecha, densidad básica, y rendimiento en pulpa kraft, como los únicos aspectos en la ecuación de cálculo de rentabilidad (Greaves y Borralho, 1996; Greaves *et al.*, 1997a; Greaves *et al.*, 1997b).

Existe algún interés de los miembros del programa por hacer mejoramiento para productos alternativos, como madera sólida, y se ha desarrollado un objetivo de mejora general pensando en maximizar las oportunidades para el uso futuro de las plantaciones (Greaves *et al.*, 2004a; Dutkowski *et al.*, 2007). El programa ha sido modelado mediante *softwares* de simulación que permiten que las estrategias de mejoramiento y propagación se pueden evaluar rutinariamente (Dutkowski, 2004; Dutkowski *et al.*, 2007). Aproximadamente el 20% de los esfuerzos de mejoramiento están dedicados a evaluar aspectos relevantes para objetivos secundarios del mejoramiento, como productos alternativos (Ej. Calidad de fuste y ramas) y también prevención de riesgos abióticos (Ej. sequía) y bióticos (Ej. la enfermedad foliar provocada por *Teratosphaeria*).

Actualmente hay una estrategia de evaluación de ensayos en dos etapas a los 4 años de edad. Primero se evalúa el DAP (diámetro a la altura del pecho) en todos los árboles y la calidad de la madera en una muestra aleatoria de individuos de cada familia, para esto el árbol es perforado para obtener una muestra de madera. En esta evaluación se emplea *near-infrared spectral analysis* (NIRA) e involucra principalmente densidad básica, pero incluye también celulosa y rendimiento pulpable (Downes *et al.*, 1997; Raymond y Apiolaza, 2004). Posteriormente, se selecciona otra muestra de madera para evaluar su calidad en base a objetivos económicos multi-rasgo y efectuar un análisis de datos de la población completa.

Las primeras mediciones de densidad de la madera se basaban en el método de penetración de Pilodyn (MacDonald *et al.*, 1997; Raymond y MacDonald, 1998), pero actualmente se extraen tarugos de 12 mm usando un taladro mecánico para estas mediciones de densidad (Li *et al.*, 2007) (Figura N°7). Se están desarrollando modelos basados en NIRA para evaluar aspectos de propiedades químicas de la madera, como contenido de celulosa (Raymond y Schimleck, 2002; Poke y Raymond, 2006), contenido de extractivos (Poke *et al.*, 2004; Alves *et al.*, 2012), contenido de lignina (Poke *et al.*, 2004) y composición (proporción de syringyl/guaiacyl) (Stackpole *et al.*, 2011; Alves *et al.*, 2011) y rendimiento en pulpa kraft (Downes *et al.*, 2007; Stackpole *et al.*, 2010c).

No obstante, solo una pequeña componente de la población de mejoramiento ha sido evaluada para estas características (Stackpole *et al.*, 2010c; Stackpole *et al.*, 2011) y las simulaciones sugieren que las futuras evaluaciones NIRA debieran enfocarse en la 2° generación, más que en adicionales muestreos extensivos en los ensayos de la población base (Pilbeam y Dutkowski, 2004). Las técnicas están actualmente siendo exploradas para evaluaciones *stream-lining NIR*, incluyendo el uso de taladro mecánico y equipo NIRA portátil (Downes *et al.*, 2010) (Figura N° 7).



(Foto: D. Pilbean)



(Foto: G. Downes)

Los tarugos se usan para evaluar la densidad básica de la madera y también como muestras de aserrín para predecir mediante un NIR aspectos químicos de la madera y rendimiento pulpable. El escaneo NIR es usado para similares predicciones y está siendo más utilizado actualmente, además puede ser usado en terreno o en laboratorio (Downes, 2011; Meder et al., 2011)

Figura N° 7

EXTRACCIÓN DE TARUGO DE 12 mm EN *Eucalyptus globulus* EN UN ENSAYO DE PROGENIE DE STBA USANDO TALADRO MECÁNICO (izq) – UN NIR PORTÁTIL (NEAR INFRARED (=NIR) (POLYCHROMIX PHAZIR™) ESCANEÁNDO LA SUPERFICIE DE LA MADERA, PREVIA EXTRACCIÓN DE UNA VENTANA DE CORTEZA, PARA PREDECIR CARACTERÍSTICA QUÍMICAS DE LA MADERA Y RENDIMIENTO EN PULPA (der)

Evaluación Genética, Selección y Cruzamiento

La evaluación genética se realiza mediante BLUP (*Best Linear Unbiased Prediction*), metodología de modelo mixto (Jarvis et al., 1995), implementada con el sistema de evaluación genética *TREEPLAN*® (Kerr et al., 2001; Kerr et al., 2002; McRae et al., 2004a). *TREEPLAN*® se usa para ajustar un modelo multivariado de árbol individual con grupos genéticos, aptitud combinatoria específica y con efectos no aditivos incluidos dentro de las familias. Esto permite integrar los datos a través de generaciones, hace posible manejar grandes cantidades de datos, no balanceados, con complejas estructuras de pedigrí y hace pleno uso de todos los datos de parentesco de pedigrí y de su desempeño (Dutkowski et al., 2006b). Los grupos genéticos usados siguen la clasificación revisada de sub razas de Dutkowski y Potts (1999). Puede manejar datos clonales, acomodar varianzas y heredabilidades heterogéneas, y modelos específicos de rasgos o caracteres.

Todas las características del diseño de ensayo están ajustadas, los datos están estandarizados a través de los ensayos por la varianza genética aditiva y la heredabilidad puede variar según los ensayos. Las variables representan diferentes características y también iguales características medidas a diferentes edades y en diferentes sitios. Como señalan Dutkowski et al. (2012), esto permite la estimación más precisa posible usando todos los datos correlacionados de diferentes características, sitios y edades, considerando el genotipo e interacciones ambientales, al igual que la selección que ha tomado lugar en estas características correlacionadas.

La información de crecimiento obtenida de los ensayos dentro de la misma región geográfica (*Western Australia, Tasmania, Gippsland o Green Triangle*) ha entregado una correlación de 1 a través del sitio y de 0,8 a través de regiones diferentes, aunque las correlaciones de ensayos agrupados y sitio están siendo reevaluadas para una mejor

consideración de la variación de sitios (Ej. disponibilidad de agua) más que de regiones geográficas, siguiendo el análisis de Costa *et al.* (2006) y Li *et al.* (2007). Dentro de este marco, rutinariamente se usa el análisis espacial utilizando residuos autocorrelacionados para una mayor consideración de las variaciones ambientales entre ensayos (Dutkowski *et al.*, 2006a). Esto se hace en un proceso de dos etapas, derivando inicialmente el mejor modelo ambiental para cada característica y cada sitio y después ajustando los datos para esos efectos. Las aproximaciones están siendo exploradas actualmente para integrar competencia de vecinos y otros efectos genéticos indirectos (Costa e Silva y Kerr, 2012; Costa e Silva *et al.*, 2013a), al igual que información molecular (Kerr *et al.*, 2011).

TREEPLAN® está integrado con *DATAPLAN*®, sistema de manejo de datos basado en Web que almacena y usa datos, diseños, pedigrí e información de parámetros genéticos. Los valores genéticos estimados para las características medidas se usan para predecir valores genéticos para rasgos de objetivos de mejora (edad de cosecha), usando una matriz de correlación y varianza para los rasgos objetivos de mejora. Esto permite dar una mayor ponderación en edades mayores o mediciones de crecimiento y calidad de madera mejor correlacionadas. Los índices de rentabilidad se usan para ordenar grupos, genotipos y familias decrecientemente de acuerdo con su valor económico ("*rankings*").

SEEDPLAN® dispone herramientas en línea, integrado con los valores genéticos de *DATAPLAN*® y *TREEPLAN*®, y está siendo desarrollado para asegurar el uso óptimo del material genético. La selección de progenitores se hace usando la herramienta *SELECT*, que determina los mejores individuos a propagar sobre la base de maximizar su índice económico, al tiempo que limita su participación mediante programación semi-definida. El mismo algoritmo se usa para seleccionar genotipos a capturar (como injertos o polen) para usarlos como progenitores, con las limitaciones impuestas por parentesco dentro la población de mejora. Este aspecto es complejo, dado que es difícil definir la actual población en programas de mejoramiento de generaciones solapadas, *rolling front*

Los cruzamientos se inician en un arboreto, donde los injertos a veces se tratan con paclobutrazol, un inhibidor de giberelina que mejora la floración y retarda el crecimiento vegetativo (Griffin *et al.*, 1993; Hetherington y Jones, 1990; Hasan y Reid, 1995; Moncur y Sunil, 1998). Las principales selecciones están crecientemente representadas en el arboreto nacional en *Mount Gambier*, establecido para manejar eficientemente la población de mejoramiento multiténea. Se efectúan polinizaciones controladas mediante el sistema de visita única (Potts *et al.*, 2008). A plena actividad, el programa tiene por meta efectuar unos 220 cruzamientos anuales con 75 progenies de hermanos completos por cruza y plantar 4 ensayos de progenie por año (Mc Rae *et al.*, 2001).

Los cruzamientos se planifican empleando la herramienta *MATE*, que usa un algoritmo heurístico de búsqueda, para maximizar el valor económico de los cruzamientos restringiendo las cruza entre parientes cercanos, y considerando la disponibilidad de genotipos como progenitores masculinos y femeninos y el conocimiento sobre qué cruzamientos han sido efectuados y para qué progenies, pero la información no está disponible aún (Kerr *et al.*, 2008). Los vínculos genéticos entre ensayos son mantenidos a través de localidades y años por medio de progenitores comunes, familias y otros vínculos de pedigrí. Los ensayos de progenie se efectúan en diseño de filas – columna latinizada y, desde 2003, se ha utilizado parcelas de árboles individuales con un promedio de 15 repeticiones por sitio.

- **Propagación y Ganancias Genéticas**

Los miembros en cooperación han capturado ganancias genéticas en el programa a través de diferentes caminos para satisfacer la alta demanda por germoplasma mejorado durante los últimos 15 años, dado que el patrimonio de plantaciones de Australia se expande rápidamente. Grandes ganancias se lograron en los años 90 a través simplemente de la obtención de semillas de polinización abierta de rodales nativos superiores identificados en los ensayos de poblaciones base.

En mejoramiento para obtención de pulpa, Apiolaza *et al.* (2005) calcularon a partir de un ensayo que las subrazas más rentables en términos de VNP/ha sobre la media de la población base fueron *Strzelecki Ranges* (Aus\$862), *Western Otways* (Aus\$658) y *Strzelecki Foothills* (Aus\$577).

Los miembros han capturado mayores ganancias económicas usando los valores de mejoramiento de *STBA* para ralea sus ensayos de progenie de población base y crear huertos semilleros de polinización abierta. Además de las ganancias aditivas, la semilla de polinización abierta de esos huertos semilleros se espera que haya reducido los niveles de cruzamientos entre parientes en comparación con semillas nativas.

Nuevas ganancias están siendo ahora obtenidas por los miembros mediante el uso de germoplasma selecto de *STBA* en sus propios huertos semilleros de polinización abierta (de plantas o clonales), o mediante el uso de semillas de huertos semilleros o de polinización masal suplementaria (Potts *et al.*, 2008). Si se usaba *SELECT* para planificar el mejor huerto semillero injertado con un *status number* de 20, entonces se estimaba que el mérito genético medio (ponderado por la contribución de cada genotipo) era equivalente a Aus\$2.962/ha de rentabilidad adicional sobre la línea base (616 progenitores de la colección CSIRO) en una rotación de 10,7 años (D. Pilbeam, datos no publicados).

MEJORAMIENTO DE *Eucalyptus nitens*

Los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus nitens* en Australia han sido revisados recientemente por Hamilton *et al.* (2008). En ese tiempo había 8 programas de tamaño y actividad variable, siendo los más grandes y activos aquellos de *Gunns Ltd.* y *Forestry Tasmania*. Esquemas detallados de los recursos genéticos y los hitos históricos de estos dos programas son dados por Hamilton *et al.* (2008).

Los ensayos de poblaciones base de *E. nitens* australianos incluyen colecciones desde bosques nativos colectadas por privados, el *Australian Tree Seed Centre (ATSC - CSIRO)* y el *State Government of Victoria*, además de infusiones desde programas de mejoramiento del extranjero.

El primer ensayo de progenie de *E. nitens* de gran escala fue establecido en los años 70 y ha completado hasta dos ciclos de mejoramiento. Los programas australianos de mejoramiento de esta especie se han enfocado en la raza *Central Victoria*, la cual en una revisión de más de 100 ensayos de terreno en muchos condados (Hamilton *et al.*, 2011a) ha demostrado estar mejor adaptada a climas de lluvias invernales como aquellos en los que principalmente se da *E. nitens* en Australia.

Antecedentes de establecimiento, selección y ciclos de cruzamiento de *E. nitens*

se pueden encontrar en de Little *et al.* (1992) y Griffin (2001). Sin embargo, restricciones biológicas asociadas con la producción de semillas, combinadas con limitados recursos financieros y/o un deseo de mantener las poblaciones de mejoramiento en generaciones discretas, han llevado a que los ciclos de mejoramiento se extiendan más allá de los marcos de tiempo óptimos en la mayor parte de los programas de mejoramiento. Las estrategias de mejoramiento *rolling front*, que hacen irrelevante el concepto de intervalos de generación discreta (Borralho y Dutkowski, 1998), están siendo crecientemente adoptadas en los programas de mejoramiento. Los vínculos de pedigrí entre los programas australianos están bien documentados mediante varios esfuerzos colaborativos históricos (Hamilton *et al.*, 2008). En tanto los programas permanecen separados, una evaluación conjunta de aquellos de *Forestry Tasmania*, *Gunns Ltd*, *HVP* y otros se está emprendiendo ahora usando *TREEPLAN*® mediante acuerdos bilaterales con *STBA* y su compañía subsidiaria *Plant Plan Genetics Pty Ltd*.

La edad de rotación, la densidad básica y el rendimiento en pulpa se han identificado como las propiedades objetivo más importantes económicamente para pulpa kraft de eucalipto (Borralho *et al.*, 1993; Greaves *et al.*, 1997c) y las típicas características de selección empleadas son DAP, densidad básica del duramen y/o penetración de Pilodyn. Históricamente, la selección para rendimiento en pulpa se ha efectuado mediante pruebas destructivas de muestras en laboratorio (Tibbits y Hodge, 1998). Sin embargo, el Espectroscopio de Reflectancia (NIRA) (Schimleck *et al.*, 2004) es ahora de creciente uso (Greaves *et al.*, 1996b; Downes *et al.*, 2010).

Aunque *E. nitens* es reconocido como resistente a frío, maximizar la rentabilidad de plantaciones establecidas en sitios fríos es un objetivo secundario para algunos productores en Tasmania (de Little *et al.*, 1993; Dutkowski *et al.*, 2006b). La evaluación de daño por frío y del crecimiento en ensayos establecidos en sitios fríos es considerado el medio más efectivo para la selección para tolerancia a frío (Tibbits y Hodge, 2003). En la etapa de propagación, reducir la palatabilidad de las plantas para mamíferos herbívoros es también un objetivo secundario de al menos uno de los programas de propagación de *E. nitens* (Miller *et al.*, 2009; Miller *et al.*, 2011).

Durante la última década, el mejoramiento de la rentabilidad para madera sólida (madera aserrada, chapas) de las plantaciones ha adquirido creciente importancia como objetivo para los productores (Hamilton *et al.*, 2008; Blackburn *et al.*, 2012) y el refinamiento de los objetivos de mejoramiento para madera sólida es una prioridad de investigación en marcha. El volumen de cosecha, el diámetro de la troza y su rectitud, el valor por productos, el tamaño de nudos, la dureza, la estabilidad de la madera en uso, los defectos de secado (grietas) y las propiedades de resistencia (rigidez) son propiedades identificadas como características objetivo potenciales para madera sólida (Raymond, 2000; Greaves *et al.*, 2004a; Nolan *et al.*, 2005; Hamilton y Potts, 2008). A diferencia de *E. globulus*, la madera aserrada de *E. nitens* no parece sufrir significativas pérdidas por tensión de la madera, pero la formación de grietas internas durante el secado es una importante fuente de rechazo de piezas (Blackburn *et al.*, 2010; Potts *et al.*, 2011) (Cuadro N° 2).

La mayoría de las características que afectan la calidad o recuperación de madera aserrada o chapas de *E. nitens* están bajo algún grado de control genético y son susceptibles de mejoramiento genético. (Hamilton y Potts, 2008; Hamilton *et al.*, 2009; Blackburn *et al.*, 2010; Blackburn *et al.*, 2011; Blackburn *et al.*, 2012). Las correlaciones genéticas sugieren

que el mejoramiento previo de *E. nitens* para pulpa no tendría un impacto negativo significativo en la calidad de la madera para aserrío (Kube y Raymond, 2001) o producción de chapas (Blackburn *et al.*, 2012). La excepción es la selección para mayor crecimiento, que puede incrementar el agrietamiento de los extremos de las trozas (Blackburn *et al.* 2011) y afectar negativamente la densidad de la madera y la contracción (Hamilton y Potts, 2008; Hamilton *et al.*, 2009). No obstante, desde el punto de vista positivo, la selección para mayor diámetro del fuste en edad temprana debiera mejorar la supervivencia hasta la edad de cosecha, el diámetro del fuste y su rectitud, al igual que la producción en volumen de madera en el estado verde (Blackburn *et al.*, 2011).

En términos de rasgos de selección, la velocidad de onda acústica en árboles en pie (AWV)⁴ está empezando a ser usada para evaluaciones no destructivas de propiedades de la madera para mejoramiento de la calidad de la madera y chapas en *E. nitens* (Figura N° 8). Estudios recientes en *Tasmania* demuestran que variación en la velocidad de transmisión de una onda acústica en árboles en pie tiene un fuerte control genético y una alta correlación genética positiva con el módulo de elasticidad (MOE, medida de rigidez) de piezas de madera (Blackburn *et al.*, 2010) y de láminas de chapas (Blackburn *et al.*, 2012), lo que es una medida indirecta de su rigidez. La rigidez y las grietas internas son aparentemente independientes genéticamente entre sí (Blackburn *et al.*, 2010). Por otra parte, las correlaciones genéticas, entre grietas superficiales e internas en madera aserrada son solo moderadamente positivas.



(Foto: D. Blackburn)

Figura N° 8
MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE LA ONDA ACÚSTICA (AWV)
EN ÁRBOLES EN PIE DE *Eucalyptus nitens*.

⁴ El timer FAKOPPTM microsecond (single pass) está siendo usado para medir el tiempo de vuelo de una onda estrés entre dos sondas localizadas a 0,5 y a 1,7 m desde la base de cada árbol. La onda estrés acústica (AWV) es iniciada golpeando la sonda transductora de la base del árbol con un martillo. La velocidad acústica estimada mediante el tiempo de vuelo de la señal entre las sondas provee una evaluación indirecta de la rigidez de la madera en árboles en pie y ha probado su capacidad para establecer un ranking de familias para esta importante característica de la madera sólida en ensayos de mejoramiento (Blackburn *et al.*, 2010; Blackburn *et al.*, 2012).

MEJORAMIENTO MOLECULAR

El mejoramiento genético de *Eucalyptus globulus* y *E. nitens* en Australia ha estado basado en la explotación de aproximaciones de genética cuantitativa. Las tecnologías moleculares hasta ahora han contribuido principalmente a través de la cuantificación de la estructura de poblaciones, parentesco, diversidad genética y consanguinidad, y también estimaciones de tasas de cruzamiento y control de calidad.

Sin embargo, ha habido importantes avances en genómica de eucaliptos y tecnologías de marcadores en los recientes años, lo que ha llevado a un rápido incremento del conocimiento del genoma de eucalipto y la arquitectura de los rasgos de selección (Poke *et al.*, 2005; Myburg *et al.*, 2007; Grattapaglia y Kirst, 2008; Mamani *et al.*, 2010; Grattapaglia *et al.*, 2012), de modo que el momento en que las tecnologías de mejoramiento molecular se integren en los programas de mejoramiento australianos se aproxima rápidamente.

Aceptando una propuesta de la Red Internacional de Genética de Eucaliptos (EUCAGEN <http://web.up.ac.za/eucagen/>), el *US Department of Energy's Joint Genome Facility* entregó al dominio público el genoma ensamblado de *E. grandis* en abril de 2011 y se ha re-secuenciado un genoma de *E. globulus* (<http://web.up.ac.za/eucagen/>).

Esta expansión de los recursos genómicos ha coincidido con el reciente desarrollo del *Diversity Arrays Technology (DART)* para eucaliptos (Sansaloni *et al.*, 2011; Steane *et al.*, 2011). DART ha permitido a un costo-efectivo la generación de mapas de asociación de alta densidad (Kullan *et al.*, 2011) para proporcionar el marco para un mapeo comparativo (Hudson *et al.*, 2012b), la generación de un mapa de consenso multi especies (Hudson *et al.* 2012a), y la expansión e integración de estudios de loci de características cuantitativas (QTL) a través de múltiples pedigrís y especies. Los mapas de múltiple asociación y los estudios asociados de QTL han sido generados para *E. nitens* y *E. globulus* en Australia, con QTL publicados para numerosas características, incluyendo resistencia a enfermedades (Freeman *et al.* 2008b), resistencia frío (Byrne *et al.*, 1997), química de la hoja (Freeman *et al.*, 2008a; O'Reilly-Wapstra *et al.*, 2011), propiedades de la madera y crecimiento (Bundock *et al.*, 2008; Freeman *et al.*, 2009; Thumma *et al.*, 2010a; Thumma *et al.*, 2010b).

En *E. globulus*, recientes pruebas de la estabilidad de QTL de crecimiento y propiedades de la madera, a través de ambientes y pedigrís marcadamente diferentes, mostraron que muchos QTL eran estables y proveen objetivos promisorios para la aplicación de selección asistida por marcadores (Freeman *et al.* 2012). Las secuencias de los marcadores DART permiten que los QTL se puedan relacionar a la secuencia del genoma de *E. grandis* para ayudar a identificar genes candidatos para asociación genética y otros estudios genómicos. La transferencia de información genómica entre especies está respaldada por la alta sintenia⁵ (*synteny*) y colinearidad recientemente demostrada entre mapas de asociación de *E. grandis* y *E. globulus* basados en DART (Hudson *et al.*, 2012b), aunque pronto serán posibles las asociaciones directas con un genoma de referencia de *E. globulus* (Rigault *et al.*, 2012).

Estudios de asociación genética con el objetivo de identificar cambios moleculares (Ej. Polimorfismo de Nucleótido Simple SNP) destacan que la variación fenotípica en muchas propiedades de la madera están bien avanzadas en *E. nitens* y *E. globulus* (Thumma *et al.*,

5 Grado de similitud de dos juegos de cromosomas que se están comparando uno con el otro.

2005; Thumma *et al.*, 2009; Southerton *et al.*, 2010; Thavamanikumar *et al.*, 2011), aunque la estabilidad de las asociaciones de marcador-carácter, entre los distintos pedigríes y ambientes, aún es un aspecto clave de investigación (Southerton *et al.*, 2010; Dillon *et al.*, 2012).

La primera prueba operacional del uso de los marcadores para mejorar el rendimiento en pulpa fue efectuada en 2011 con *E. nitens* (Kerr *et al.*, 2011). Se está en el umbral de grandes avances que verán un creciente número de asociaciones de marcadores-caracteres validadas y disponibles para rasgos del interés de los mejoradores, y potencialmente para el desarrollo de estrategias amplias de genoma para selección (Grattapaglia y Resende, 2011; Resende *et al.*, 2012).

Un importante desafío será integrar esta información molecular en programas de mejoramiento de manera tal que sea costo-eficiente y competitiva con los avances de tecnologías de fenotipo (Kerr *et al.*, 2011). Los altos costos de los objetivos de tecnología de fenotipo de caracteres asociados a productos de madera sólida (Ej. Contracción y colapso en el secado de la madera) (Sexton *et al.* 2012), combinados con el mayor tiempo de rotación de esas plantaciones harían sin duda de los caracteres objetivo para madera una importante meta para mejoramiento molecular.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece a los Drs. Greg Dutkowski, Richard Kerr, Tony Mc Rae, Dean Williams y Kelsey Joyce sus comentarios en el borrador en inglés del capítulo; al Ing. Santiago Barros por su traducción al español del manuscrito en inglés, y a los Drs. Nuno Borralho y Roberto Ipinza por la invitación a participar en esta obra.

REFERENCIAS

ABARES, 2011. Australia's forests at a glance 2011. Commonwealth of Australia, Canberra.

Almeida, MH, Pereira, H. Miranda. and Tome, M, 1995. Provenance trials of *Eucalyptus globulus* Labill. in Portugal. Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Tasmania. (Eds BM Potts, Borralho, NMG, Reid, JB.; Cromer, RN, Tibbits, WN and Raymond, CA., pp. 195-198. CRC for Temperate Hardwood Forestry.

Alves, A, Simoes, R, Stackpole, DJ, Vaillancourt, R. E, Potts, BM, Schwanninger, M, Rodrigues, J., 2011. Determination of the syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus globulus* wood lignin by near infrared-based partial least squares regression models using analytical pyrolysis as the reference method. Journal of Near Infrared Spectroscopy 19, 343-348.

Alves, AMM, Simoes RFS, Santos CA, Potts BM, Rodrigues J, Schwanninger M., 2012. Determination of *Eucalyptus globulus* wood extractives content by near infrared-based partial least squares regression models: comparison between extraction procedures. Journal of Near Infrared Spectroscopy 20, 275-285.

Apiolaza, LA, Raymond, CA, Yeo, B. J., 2005. Genetic variation of physical and chemical wood properties of *Eucalyptus globulus*. Silvae Genetica 54, 160-166.

Araújo JA, Sousa R, Lemos L, Borralho NMG., 1996. Estimates of genetic parameters and prediction of breeding values for growth in *Eucalyptus globulus* combining clonal and full-sib progeny trial information. Silvae Genetica 45, 223-226.

Barbour, L., 1997. Breeding Better Blue Gums. Landscape 13, 37-41.

Barbour, L, Butcher, T., 1996. The Western Blue Gums are here! Landscape 51, 50-53.

Barbour, RC, Otahal, Y, Vaillancourt, R.E, Potts, BM., 2008. Assessing the risk of pollen-mediated gene flow from exotic *Eucalyptus globulus* plantations into native Eucalypt populations of Australia. *Biological Conservation* 141, 896-907.

Beadle, C, Volker, P, Bird, T, Mohammed, C, Barry, K, Pinkard, L, Wiseman, D, Harwood, C, Washusen, R, Wardlaw, T, Nolan, G., 2008. Solid-wood production from temperate Eucalypt plantations: A Tasmanian case study. *Southern Forests* 70, 45-57.

Blackburn, D, Farrell, R, Hamilton, M, Volker, P, Harwood, C, Williams, D, Potts, BM., 2012. Genetic improvement for pulpwood and peeled veneer in *Eucalyptus nitens*. *Canadian Journal of Forest Research* 42, 1724-1732.

Blackburn, D, Hamilton, M, Harwood, C, Innes, T, Potts, BM, Williams, D., 2011. Genetic variation in traits affecting sawn timber recovery in plantation grown *Eucalyptus nitens*. *Annals of Forest Science* 68, 1187-1195.

Blackburn, D, Hamilton, M, Harwood, C, Innes, T, Potts, B, Williams, D., 2010. Stiffness and checking of *Eucalyptus nitens* sawn boards: Genetic variation and potential for genetic improvement. *Tree Genetics and Genomes* 6, 757-765.

Blackburn, D, Hamilton, M, Harwood, C, Baker, T, Potts, BM., 2013. Assessing genetic variation in *Eucalyptus globulus* stem straightness. *Annals of Forest Science* submitted.

Boland, DJ, Brooker, MIH, Chippendale, GM, Hall, N, Hyland, BPM, Johnston RD, Kleinig, DA, Turner, JD., 1992. *Forest Trees of Australia*. (CSIRO Publications Melbourne, Victoria)

Borralho, NMG, Cotterill, PP, Kanowski, PJ., 1993. Breeding objectives for pulp production of *Eucalyptus globulus* under different industrial cost structures. *Canadian Journal of Forest Research* 23, 648-656.

Borralho, NMG, Dutkowski, GW., 1998. Comparison of rolling front and discrete generation breeding strategies for trees. *Canadian Journal of Forest Research* 28, 987-993.

Brooker, MIH., 2000. A new classification of the genus *Eucalyptus* L'Her. (*Myrtaceae*). *Australian Systematic Botany* 13, 79-148.

Bundock, PC, Potts, BM, Vaillancourt, RE., 2008. Detection and stability of quantitative trait loci (QTL) in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes* 4, 85-95.

Bush, D., 2011. Selecting and breeding Eucalypts for natural durability. In *Developing a eucalypt resource: learning from Australia and elsewhere*. (Ed. J Walker) pp. 125-136. (Wood Technology Research Centre, University of Canterbury: Christchurch, New Zealand)

Bush, D, Kain, D, Matheson, C, Kanowski, P., 2011. Marker-based adjustment of the additive relationship matrix for estimation of genetic parameters - an example using *Eucalyptus cladocalyx*. *Tree Genetics & Genomes* 7, 23-35.

Butcher, TB., 1986. *Eucalyptus globulus* provenance trials in Western Australia. *Proceeding of the ninth meeting (Burnie) Research Working Group No. 1, Forest Genetics* pp. 95-96. (Australian Forest Council, Canberra)

Butcher, TB., 1990. *Eucalyptus globulus* tree improvement cooperative in Western Australia. Department of Conservation and Land Management (Western Australia), Perth, Western Australia.

Byrne, M., 1999. Genetic relationships in the *E. kochii* group of Oil Mallees. *The Dinkum Oil*, 15-17.

Byrne, M, Murrell, JC, Owen, JV, Williams, ER, Moran, GF., 1997. Mapping of quantitative trait loci influencing frost tolerance in *Eucalyptus nitens*. *Theoretical and Applied Genetics* 95, 975-979.

Callister, A, Collins, R., 2007. Genetic selection reduces the cost of *Eucalyptus globulus* seed produced by mass supplementary pollination. *Proceedings of the IUFR0 Working Group 2.08.03 - Eucalypts and diversity: balancing productivity and sustainability*. Durban, South Africa, 22-26 October 2007

- Callister, AN, England, N, Collins, S., 2011.** Genetic analysis of *Eucalyptus globulus* diameter, straightness, branch size, and forking in Western Australia. *Canadian Journal of Forest Research* 41, 1333-1343.
- Callister, AN, England, N, Collins, S., 2012.** Predicted genetic gain and realised gain in stand volume of *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes* DOI 10.1007/s11295-012-0558-8.
- Chippendale, GM., 1988.** *Eucalyptus, Angophora (Myrtaceae)*. Flora of Australia.' (Australian Govt. Publishing Service: Canberra)
- Collins, SL, Callister, AN., 2010.** Genetic and environmental influences on capsule retention following controlled pollination of *Eucalyptus globulus* flowers. *Australian Forestry* 73, 198-203.
- Cook, IO, Ladiges, PY., 1991.** Morphological variation within *Eucalyptus nitens*. lat. and recognition of a new species, *E. denticulata*. *Australian Systematic Botany* 4, 375-390.
- Costa e Silva, J, Hardner, C, Potts, BM., 2010a.** Genetic variation and parental performance under inbreeding for growth in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science* 67, 606, DOI: 10.1051/forest/2010019
- Costa e Silva, J, Hardner, C, Tilyard, P, Pires, AM, Potts, BM., 2010b.** Effects of inbreeding on population mean performance and observational variances in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science* 67, 605, DOI: 10.1051/forest/2010018
- Costa e Silva, J, Hardner, C, Tilyard, P, Potts, BM., 2011.** The effects of age and environment on the expression of inbreeding depression in *Eucalyptus globulus*. *Heredity* 107, 50-60.
- Costa e Silva, J, Kerr, R., 2012.** Accounting for competition in genetic analysis, with particular emphasis on forest genetic trials. *Tree Genetics & Genomes* submitted.
- Costa e Silva, J, Potts, B, Tilyard, P., 2012.** Epistasis causes outbreeding depression in Eucalypt hybrids. *Tree Genetics & Genomes* 8, 249-265.
- Costa e Silva, J, Potts, BM, Bijma, P, Kerr, RJ, Pilbeam, DJ., 2013a.** Genetic control of interactions among individuals: contrasting outcomes of indirect genetic effects arising from neighbour disease infection and competition in a forest tree. *New Phytologist* 197, 631-641.
- Costa e Silva, J, Potts, BM, Dutkowski, G., 2006.** Genotype by environment interaction for growth of *Eucalyptus globulus* in Australia. *Tree Genetics and Genomes* 2, 61-75.
- Costa e Silva, JC, Potts, BM, Tilyard, P., 2013b.** Stability of genetic effects across clonal and seedling populations of *Eucalyptus globulus* with common parentage. *Forest Ecology and Management* in press.
- Cotterill, P, Macrae, S, Brolin, A., 1999.** Growing Eucalypt for high-quality papermaking fibres. *Appita Journal* 52, 79-83.
- de Little, D., 2004.** Historical review of cloning R&D for temperate commercial Eucalypts in Australia.' CRC for Sustainable Production Forestry, Hobart.
- de Little, DW, Tibbits, WN, Rasmussen, GF, Ravenwood, IC., 1992.** Genetic improvement strategy for APPM Eucalypt tree farms in Tasmania. *Mass Production Technology for Genetically Improved Fast Growing Forest Tree Species (AFOCEL-IUFRO Symposium 1992)*. Bordeaux pp. 275-288. (Association Forêt Cellulose: Nangis - France)
- de Little, DW, Tibbits, WN, Rasmussen, GF, Ravenwood, IC., 1993.** Genetic improvement strategy for APPM Eucalypt tree farms in Tasmania (1st edn). *Mass production technology for genetically improved fast growing forest tree species*. Proc. AFOCEL/IUFRO Conference, Bordeaux. France 14-18 September 1992 (AFOCEL: Nangis, France)
- Dean, GH, French, J, Tibbits, WN., 1990.** Variation in pulp and papermaking characteristics in a field trial of *Eucalyptus globulus*. 44th Appita Annual General Conference. Rotorua, New Zealand, 2-6 April 1990

Dillon, SK, Brawner, JT, Meder, R, Lee, DJ, Southerton, SG., 2012. Association genetics in *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* identifies single nucleotide polymorphisms affecting wood growth and cellulosic pulp yield. *New Phytologist* 195, 596-608.

Downes, G., 2011. Developing and assessing a woodmeal calibration for the Polychromix Phazir™. Technical Report 212. CRC for Forestry, Hobart.

Downes, G, Catela, F, Meder, R., 2007. Developing and evaluating a global NIR calibration for the prediction of kraft pulp yield in Eucalypts. Eucalypts and Diversity: Balancing Productivity and Sustainability, IUFRO conference, Durban, South Africa, 22-26 October 2007 p. CD ROM

Downes, G, Meder, R, Harwood, C., 2010. A multi-site, multi-species near infrared calibration for the prediction of cellulose content in Eucalypt woodmeal. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 18, 381-387.

Downes, GM, Hudson, IL, Raymond, CA, Dean, GH, Michell, AJ, Schimleck, LR, Evans, R, Muneri, A., 1997. Sampling Plantation Eucalypts for Wood and Fibre Properties. (CSIRO Australia: Melbourne)

Drake, PL, Mendham, DS, White, DA, Ogden, GN, Dell, B., 2012. Water use and water-use efficiency of coppice and seedling *Eucalyptus globulus* Labill.: a comparison of stand-scale water balance components. *Plant and Soil* 350, 221-235.

Dutkowski, G, Kerr, R, Tier, B, Li, L, Costa e Silva, J, Ivković, M, Potts, B, McRae, T., 2012. Next Generation Breeding Values. In 'Proceedings of AdapCAR Conference on 'Genetic Aspects of Adaptation and Mitigation: Forest Health , Wood Quality and Biomass Production', Riga, Latvia, 3-5 October 2012'.

Dutkowski, G, Pilbeam, D, McRae, T., 2007. Economic models to direct breeding for future environments. Eucalypts and Diversity: Balancing Productivity and Sustainability, IUFRO conference, Durban, South Africa, 22-26 October 2007 pp. 9, on CD ROM

Dutkowski, GW., 2004. GSIM - a tree breeding and deployment simulator. *Eucalyptus in a Changing World*. Aveiro, Portugal. (Eds NMG Borralho, Pereira JS, Marques C, Coutinho J, Madeira M and Tomé M) p. 189. (RAIZ, Instituto Investigação de Floresta e Papel)

Dutkowski, GW, Costa e Silva, J, Gilmour, AR, Wellendorf, H, Aguiar, A., 2006a. Spatial analysis enhances modelling of a wide variety of traits in forest genetic trials. *Canadian Journal of Forest Research* 36, 1851-1870.

Dutkowski, GW, Gore, PL, McRae, T, Pilbeam, D, Apiolaza, L., 2000. The STBA Cooperative Tree Improvement Strategy for *Eucalyptus globulus*. Southern Tree Breeding Association/CRCSPF, TR99-03, Mount Gambier, South Australia / Hobart, Tasmania.

Dutkowski, GW, McRae, TA, Powell, MB, Pilbeam, DJ, Joyce, J, Tier, B, Kerr, RJ., 2006b. Benefits from data and pedigree integration in genetic evaluation. Breeding for Success: Diversity in Action. 13th Australasian Tree Breeding Conference. 18-21 April, 2006. Christchurch , New Zealand

Dutkowski, GW, Potts, BM., 1999. Geographic patterns of genetic variation in *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* and a revised racial classification. *Australian Journal of Botany* 47, 237-263.

Dutkowski, GW, Potts, BM, Williams, DR, Kube, PD, McArthur, C., 2001. Geographic genetic variation in Central Victorian *Eucalyptus nitens*. Developing the Eucalypt of the Future. Valdivia, Chile p. 39. (INFOR)

Eldridge, K, Davidson, J, Harwood, C, van Wyk, G., 1993. Eucalypt domestication and breeding. (Clarendon Press: Oxford, UK)

Freeman, JS, O'Reilly-Wapstra, JM, Vaillancourt, RE, Wiggins, N, Potts, BM., 2008a. Quantitative trait loci for key defensive compounds affecting herbivory of Eucalypts in Australia. *New Phytologist* 178, 846-851.

Freeman, JS, Potts, BM, Downes, GM, Pilbeam, D, Thavamanikumar, S, Vaillancourt, RE., 2012. Stability of QTL for growth and wood properties across multiple pedigrees and environments in *Eucalyptus globulus*. submitted

- Freeman, JS, Potts, BM, Vaillancourt, RE., 2008b.** Few Mendelian genes underlie the quantitative response of a forest tree, *Eucalyptus globulus*, to a natural fungal epidemic. *Genetics* 178, 563-571.
- Freeman, JS, Whittock, SP, Potts, BM, Vaillancourt, RE., 2009.** QTL influencing growth and wood properties in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics and Genomes* 5, 713-722.
- Gardiner, CA, Crawford, DA., 1987.** 1987 Seed Collections of *Eucalyptus globulus* subsp. *globulus* for tree improvement purposes. (CSIRO Division of Forest Research: Canberra, Australia)
- Gardiner, CA, Crawford, DA., 1988.** 1988 Seed Collections of *Eucalyptus globulus* subsp. *globulus* for tree improvement purposes. (CSIRO Division of Forest Research: Canberra, Australia)
- Gavran, M., 2012.** Australian Plantation Statistics 2012 update, June. pp. 14. (Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences: Canberra)
- Gavran, M, Parsons, M., 2011.** Australian Plantation Statistics 2011 pp. 43. (Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences: Canberra)
- Grattapaglia, D, Kirst, M., 2008.** *Eucalyptus* applied genomics: from gene sequences to breeding tools. *New Phytologist* 179, 911-929.
- Grattapaglia, D, Resende, MDV., 2011.** Genomic selection in forest tree breeding. *Tree Genetics & Genomes* 7, 241-255.
- Grattapaglia, D, Vaillancourt, RE, Shepherd, M, Thumma, BR, Foley, W, Kuelheim, C, Potts, BM, Myburg, AA., 2012.** Progress in *Myrtaceae* genetics and genomics: *Eucalyptus* as the pivotal genus. *Tree Genetics & Genomes* 8, 463-508.
- Greaves, BL, Borralho, MG., 1996.** The influence of basic density and pulp yield on the cost of Eucalypt kraft pulping: a theoretical model of tree breeding. *Appita* 49, 90-95.
- Greaves, BL, Borralho, MG, Raymond, CA., 1997a.** Assumptions underlying the use of economic weights- Are they valid in breeding for Eucalypt kraft pulp? *Forest Genetics* 4, 35-42.
- Greaves, BL, Borralho, MG, Raymond, CA., 1997b.** Breeding objective for plantation Eucalypts grown for production of kraft pulp. *Forest Science* 43, 465-475.
- Greaves, BL, Borralho, NMG, Raymond, CA., 1996a.** Breeding objectives for plantation Eucalypts grown for production of kraft pulp. *Forest Science* 43, 465-472.
- Greaves, BL, Borralho, NMG, Raymond, CA., 1997c.** Breeding objective for plantation Eucalypts grown for production of kraft pulp. *Forest Science* 43, 465-475.
- Greaves, BL, Dutkowski, GW, McRae, TA., 2004a.** Breeding objectives for *Eucalyptus globulus* for products other than kraft pulp. *Eucalyptus in a Changing World*. Aveiro, Portugal. (Eds NMG Borralho, Pereira JS, Marques C, Coutinho J, Madeira M and Tomé M) pp. 175-180. (RAIZ, Instituto Investigação de Floresta e Papel)
- Greaves, BL, Hamilton, M, Pilbeam, DJ, Dutkowski, GW., 2004b.** Genetic variation in commercial properties of six and fifteen year-old *Eucalyptus globulus*. *Eucalyptus in a Changing World*. Aveiro, Portugal. (Eds NMG Borralho, Pereira JS, Marques C, Coutinho J, Madeira M and Tomé M) pp. 97-102. (RAIZ, Instituto Investigação de Floresta e Papel)
- Greaves, BL, Schimleck, L, Borralho, NMG, Michell, AJ, Raymond, CA., 1996b.** Genetic control and repeatability of near infrared reflectance from *Eucalyptus nitens* ground wood. *Appita Journal* 49, 423-426.
- Griffin, AR., 2001.** Deployment decisions - capturing the benefits of tree improvement with clones and seedlings. *Developing the Eucalypt of the Future*. Valdivia, Chile. (INFOR)

- Griffin, AR, Whitemen, P., Rudge, T., Burgess, I. P., Moncur, M. W., 1993.** Effect of paclobutrazol on flower-bud production and vegetative growth in two species of *Eucalyptus*. *Canadian Journal of Forest Research* 23, 630-647.
- Grosser, C, Potts, BM, Vaillancourt, RE., 2010.** Microsatellite based paternity analysis in a clonal *Eucalyptus nitens* seed orchard. *Silvae Genetica* 59, 57-62.
- Hamilton, M, Dutkowski, G, Joyce, K, Potts, B., 2011a.** Meta-analysis of racial variation in *Eucalyptus nitens* and *E. denticulata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 41, 217-230.
- Hamilton, M, Joyce, K, Williams, D, Dutkowski, G, Potts, B., 2008.** Achievements in forest tree improvement in Australia and New Zealand - 9. Genetic improvement of *Eucalyptus nitens* in Australia. *Australian Forestry* 71, 82-93.
- Hamilton, MG, Greaves, BL, Potts, BM, Dutkowski, GW., 2007.** Patterns of longitudinal within-tree variation in pulpwood and solidwood traits differ among *Eucalyptus globulus* genotypes. *Annals of Forest Science* 64, 831-837.
- Hamilton, MG, Potts, BM., 2008.** Review of *Eucalyptus nitens* genetic parameters. *New Zealand Journal of Forestry Science* 38, 102-119.
- Hamilton, MG, Potts, BM, Greaves, BL, Dutkowski, GW., 2010.** Genetic correlations between pulpwood and solidwood selection and objective traits in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science* 67, Article No. 511, 10 pages.
- Hamilton, MG, Raymond, CA, Harwood, CE, Potts, BM., 2009.** Genetic variation in *Eucalyptus nitens* pulpwood and wood shrinkage traits. *Tree Genetics & Genomes* 5, 307-316.
- Hamilton, MG, Tilyard, PA, Williams, DR, Vaillancourt, RE, Wardlaw, TJ, Potts, BM., 2011b.** The genetic variation in the timing of heteroblastic transition in *Eucalyptus globulus* is stable across environments. *Australian Journal of Botany* 59, 170-175.
- Hamilton, MG, Williams, DR, Tilyard, PA, Pinkard, EA, Wardlaw, TJ, Glen, M, Vaillancourt, RE, Potts, BM., 2012.** A latitudinal cline in disease resistance of a host tree. *Heredity*.
- Harbard, JL, Griffin, AR, Espejo, J., 1999.** Mass controlled pollination of *Eucalyptus globulus*: a practical reality. *Canadian Journal of Forest Research* 29, 1457-1463.
- Hardner, C, Tibbits, W., 1998.** Inbreeding depression for growth, wood and fecundity traits in *Eucalyptus nitens*. *Forest Genetics* 5, 11-20.
- Harwood, C., 2011.** Introductions: doing it right. In *Developing a Eucalypt resource: learning from Australia and elsewhere*. (Ed. J Walker) pp. 43-54. (Wood Technology Research Centre, University of Canterbury: Christchurch, New Zealand)
- Harwood, CE, Bush, DJ, Butcher, T, Birds, R, Henson, M, Lott, R, Shaw, S., 2007.** Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand. 4: Tree improvement for low-rainfall farm forestry. *Australian Forestry* 70, 23-27.
- Hasan, O, Reid, JB., 1995.** Reduction of generation time in *Eucalyptus globulus*. *Plant Growth Regulation* 53, 53-60.
- Hendrati, R, Byrne, M, Barbour, E, Plummer, J., 2011.** Effect of genetic relatedness among parents on gain in salt tolerance in progeny of crosses of *Eucalyptus occidentalis*. *Silvae Genetica* 60, 45-55.
- Hetherington, S, Jones, KM., 1990.** Effectiveness of paclobutrazol in retarding height growth of *Eucalyptus globulus* seedlings. *Canadian Journal of Forest Research* 20, 1811-1813.
- Hingston, AB, McQuillan, PB, Potts, BM., 2004a.** Pollinators in seed orchards of *Eucalyptus nitens* (Myrtaceae). *Australian Journal of Botany* 52, 209-222.
- Hingston, AB, Potts, BM, McQuillan, PB., 2004b.** Pollination services provided by various size classes of flower visitors to *Eucalyptus globulus ssp globulus* (Myrtaceae). *Australian Journal of Botany* 52, 353-369.

Hingston, AB, Potts, BM, McQuillan, PB., 2004c. The Swift Parrot *Lathamus discolor* (Psittacidae), social bees (Apidae) and native insects as pollinators of *Eucalyptus globulus* ssp *globulus* (Myrtaceae). Australian Journal of Botany 52, 371-379.

Hudson, CJ, Freeman, JS, Kullán, ARK, Petrolí, CD, Sansaloni, CP, Kilian, A, Detering, F, Grattapaglia, D, Potts, BM, Myburg, AA, Vaillancourt, RE., 2012a. A reference linkage map for *Eucalyptus*. BMC Genomics 13, 240.

Hudson, CJ, Kullán, ARK, Freeman, JS, Faria, DA, Grattapaglia, D, Kilian, A, Myburg, AA, Potts, BM, Vaillancourt, RE., 2012b. High synteny and colinearity among *Eucalyptus* genomes revealed by high-density comparative genetic mapping. Tree Genetics & Genomes 8, 339-352.

Hunde, T, Gizachew, B, Harwood, C., 2007. Genetic variation in survival and growth of *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* in Ethiopia. Australian Forestry 70, 48-52..

Iglesias-Trabado, G, Arballeira-Tenreiro, R, Folgueira-Lozana, J., 2009. *Eucalyptus* Universalis: Global cultivated Eucalypt forests map. Version 1.2. In 'Eucalyptologies information resources on eucalypt cultivation worldwide. Retrieved from <http://www.git-forestry.com> (October 19th 2009)'

Infante, P, Prado, JA., 1989. Growth of 35 *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* provenances in the nursery. Ciencia e Investigación Forestal No. 7, 83-89.

Infante, P, Prado, JA., 1991. Crecimiento juvenil de 32 procedencias y 203 familias de *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* en la zona costera de la VIII Región de Chile. Ciencia e Investigación Forestal 5, 251-265.

Ipinza, RH, García, X, Apiolaza, LA, Molina, MP, Chung, P, Parra, P., 1994. Variación juvenil de un ensayo de procedencias y familias de *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* Labill, en la séptima región, Chile. Ecología 8, 259-270.

Jarvis, S, Borralho, NMG., 1995. The STBA Cooperative Breeding Strategy of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. Southern Tree Breeding Association, and Cooperative Research Centre for Sustainable Production Forestry, TR 95-03, Mount Gambier, South Australia.

Jarvis, SF, Borralho, NMG, Potts, BM., 1995. Implementation of a multivariate BLUP model for genetic evaluation of *Eucalyptus globulus* in Australia. Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Tasmania. (Eds BM Potts, Borralho NMG, Reid JB, Cromer RN, Tibbits WN and Raymond CA) pp. 212-216. (CRC for Temperate Hardwood Forestry)

Jones, RC, Steane, DA, Lavery, M, Vaillancourt, RE, Potts, BM., 2012. Multiple evolutionary processes drive the patterns of genetic differentiation in a forest tree species complex. Ecology and Evolution, 3, 1-17.

Jones, TH, Steane, DA, Jones, RC, Pilbeam, D, Vaillancourt, RE, Potts, BM., 2006. Effects of domestication on genetic diversity in *Eucalyptus globulus*. Forest Ecology and Management 234, 78-84.

Jordan, GJ, Potts, BM, Kirkpatrick, JB, Gardiner, C., 1993. Variation in the *Eucalyptus globulus* complex revisited. Australian Journal of Botany 41, 763-85.

Kerr, R, Dutkowski, G, McRae, T, Pilbeam, D, Powell, M, Cameron, A, Hunter, S, Breidahl, R, Potts, B, Jones, R., 2008. Genetic gain optimisation in tree breeding (MATEPLAN) and deployment (SEEDPLAN). Report prepared for Forest & Wood Products Australia on Project Number: PN07.4025.'

Kerr, R, Thumma, B, Southerton, S, Tier, B, Dutkowski, G, McRae, T, Harwood, C., 2011. Operational testing of molecular breeding to improve pulpwood value in *Eucalyptus nitens*. CRC for Forestry, Technical Report 209 (Confidential). Hobart, Tasmania.

Kerr, RJ, Dutkowski, GW, Apiolaza, LA, McRae, TA, Tier, B., 2002. Developing a genetic evaluation system for forest tree improvement - the making of TREEPLAN®. 7th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production. Montpellier, France

Kerr, RJ, McRae, TA, Dutkowski, GW, Apiolaza, LA, Tier, B., 2001. TREEPLAN - A genetic evaluation system for forest tree improvement. Developing the Eucalypt of the Future. Valdivia, Chile. (INFOR)

- Kirkpatrick, JB., 1974.** The numerical intraspecific taxonomy of *Eucalyptus globulus* Labill. (Myrtaceae). Botanical Journal of the Linnean Society 69, 89-104.
- Kirkpatrick, JB., 1975a.** Geographical variation in *Eucalyptus globulus*. (Australian Government Publishing Service: Canberra)
- Kirkpatrick, JB., 1975b.** Natural distribution of *Eucalyptus globulus* Labill. Australian Geographer 13, 22-35.
- Kube, PD, Matheson, AC, Raymond, CA, Boomsma, DB., 1995.** Provenance variation in *Eucalyptus globulus*. Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality. Hobart, Tasmania. (Eds BM Potts, Borralho NMG, Reid JB, Cromer RN, Tibbits WN and Raymond CA) pp. 245-246. (CRC for Temperate Hardwood Forestry)
- Kube, PD, Raymond, CA., 2001.** Genetic parameters for *Eucalyptus nitens* solid wood traits and relationships with pulpwood traits. IUFRO International Symposium on Developing the Eucalypt of the Future. Valdivia, Chile
- Kube, PD, Raymond, CA., 2005.** Breeding to minimise the effects of collapse in *Eucalyptus nitens* sawn timber. Forest Genetics 12, 23-34.
- Kullan, ARK, van Dyk, MM, Jones, N, Kanzler, A, Bayley, A, Myburg, AA., 2011.** High-density genetic linkage maps with over 2,400 sequence-anchored DArT markers for genetic dissection in an F2 pseudo-backcross of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*. Tree Genetics and Genomes online (DOI 10.1007/s11295-011-0430-2).
- Lee, D, Zbonak, A, McGavin, R., 2011.** Development of *E. argophloia* in Queensland: lessons learnt. In 'Developing a Eucalypt resource: learning from Australia and elsewhere'. (Ed. J Walker) pp. 55-66. (Wood Technology Research Centre, University of Canterbury: Christchurch, New Zealand)
- Lee, DJ, Huth, JR, Osborne, DO, Hogg, BW., 2010.** Selecting hardwood taxa for wood and fibre production in Queensland's subtropics. Australian Forestry 73, 106-114.
- Li, Y, Dutkowski, GW, Apiolaza, LA, Pilbeam, DJ, Costa e Silva, J, Potts, BM., 2007.** The genetic architecture of a *Eucalyptus globulus* full-sib breeding population in Australia. Forest Genetics 12, 167-179.
- Lopez, GA, Potts, BM, Dutkowski, GW., 2001.** A comparison of native stand and land race localities of *Eucalyptus globulus* grown in Argentina. In. pp. 2. (CRC-SPF: Hobart, Tasmania)
- MacDonald, AC, Borralho, NMG, Potts, BM., 1997.** Genetic variation for growth and wood density in *Eucalyptus globulus* ssp. *globulus* in Tasmania (Australia). Silvae Genetica 46, 236-241.
- Mamani, EMC, Bueno, NW, Faria, DA, Guimarães, LMS, Lau, D, Alfenas, AC, Grattapaglia, D., 2010.** Positioning of the major locus for *Puccinia psidii* rust resistance (Ppr1) on the *Eucalyptus* reference map and its validation across unrelated pedigrees. Tree Genetics and Genomes 6, 953-962.
- McRae, TA, Dutkowski, GW, Pilbeam, DJ, Powell, MB, Tier, B., 2004a.** Genetic Evaluation Using the TREEPLAN® System. Forest Genetics and Tree Breeding in the Age of Genomics: Progress and Future. Charleston, South Carolina. (Eds B Li and McKeand S). (North Carolina State University)
- McRae, TA, Pilbeam, DJ, Gore, PL, Dutkowski, GW, Apiolaza, LA., 2001.** Australian cooperative tree improvement strategy for *Eucalyptus globulus*. Developing the Eucalypt of the Future. Valdivia, Chile p. 179. (INFOR)
- McRae, TA, Pilbeam, DJ, Powell, M, Dutkowski, GW, Joyce, K, Tier, B., 2004b.** Genetic evaluation in Eucalypt breeding programs. *Eucalyptus* in a Changing World. Aveiro, Portugal. (Eds NMG Borralho, Pereira JS, Marques C, Coutinho J, Madeira M and Tomé M) pp. 189-190. (RAIZ, Instituto Investigação de Floresta e Papel)
- Meder, R, Brawner, JT, Downes, GM, Ebdon, N., 2011.** Towards the in-forest assessment of Kraft pulp yield: comparing the performance of laboratory and hand-held instruments and their value in screening breeding trials. Journal of Near Infrared Spectroscopy 19, 421-429.
- Miller, AM, O'Reilly-Wapstra, JM, Potts, BM, McArthur, C., 2009.** Non-lethal strategies to reduce browse damage in Eucalypt plantations. Forest Ecology and Management 259, 45-55.

- Miller, AM, O'Reilly-Wapstra, JM, Potts, BM, McArthur, C., 2011.** Field screening for genetic-based susceptibility to mammalian browsing. *Forest Ecology and Management* 262, 1500-1506.
- Mimura, M, Barbour, RC, Potts, BM, Vaillancourt, RE, Watanabe, KN., 2009.** Comparison of contemporary mating patterns in continuous and fragmented *Eucalyptus globulus* native forests. *Molecular Ecology* 18, 4180-4192.
- Miranda, I, Pereira, H., 2002.** Variation of pulpwood quality with provenances and site in *Eucalyptus globulus*. *Annals of Forest Science* 59, 283-291.
- Mohammed, C, Wardlaw, T, Smith, A, Pinkard, E, Battaglia, M, Glen, M, Tommerup, I, Potts, B, Vaillancourt, R., 2003.** *Mycosphaerella* leaf diseases of temperate eucalypts around the southern pacific rim. *New Zealand Journal of Forest Research* 33, 362-372.
- Moncur, MW, Sunil, P., 1998.** Hastening seed production: a tool for increasing the rate of genetic improvement in Eucalypt species. In 'Tree Improvement: Applied Research and Technology Transfer' pp. 81-93. (Science Publishers, Inc.: Enfield; USA)
- Myburg, AA, Potts, BM, Marques, CM, Kirst, M, Gion, JM, Grattapaglia, D, Grima-Pettenati, J., 2007.** *Eucalyptus*. In 'Genome mapping and molecular breeding in plants. ' (Ed. C Kole) pp. 115-160. (Springer: New York, NY, USA)
- Nolan, G, Washusen, R, Jennings, S, Greaves, B, Parsons, M., 2005.** Eucalypt plantations for solid wood products in Australia - A review.' Forest and Wood Products Research and Development Corporation, PN04.3002, Melbourne, Victoria
- O'Brien, EK, Mazanec, RA, Krauss, SL., 2007.** Provenance variation of ecologically important traits of forest trees: Implications for restoration. *Journal of Applied Ecology* 44, 583-593.
- O'Reilly-Wapstra, JM, Freeman, JS, Davies, NW, Vaillancourt, RE, Fitzgerald, H, Potts, BM., 2011.** Quantitative trait loci for foliar terpenes in a global *Eucalypt* species. *Tree Genetics & Genomes* 7, 485-498.
- Orme, K., 1988.** Genetic improvement of *E. globulus*. Proceedings of the International Forestry Conference for the Australian Bicentenary, 1988. Albury-Wodonga, Australia p. 14. (The Australian Forest Development Institute)
- Orme, RK., 1977.** *Eucalyptus globulus* provenances. Documents FAO Third World Consultation on Forest Tree Breeding. Canberra, Australia pp. 207-221. (CSIRO)
- Pederick, LA., 1979.** Natural variation in Shining Gum (*Eucalyptus nitens*). *Australian Forest Research* 9, 41-63.
- Pilbeam, DJ, Dutkowski, GW., 2004.** Simulation to determine optimal wood quality sampling strategies. *Eucalyptus* in a Changing World. Aveiro, Portugal. (Eds NMG Borralho, Pereira JS, Marques C, Coutinho J, Madeira M and Tomé M) pp. 211-212. (RAIZ, Instituto Investigação de Floresta e Papel)
- Poke, FS, Raymond, CA., 2006.** Predicting extractives, lignin, and cellulose contents using near infrared spectroscopy on solid wood in *Eucalyptus globulus*. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 26, 187-199.
- Poke, FS, Vaillancourt, RE, Potts, BM, Reid, JB., 2005.** Genomic research in *Eucalyptus*. *Genetica* 125, 79-101.
- Poke, FS, Wright, JK, Raymond, CA., 2004.** Predicting extractives and lignin contents in *Eucalyptus globulus* using near infrared reflectance analysis. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 24, 55-67.
- Potts, B, Hamilton, M, Blackburn, D., 2011.** Genetics of Eucalypts: traps and opportunities. In 'Developing a Eucalypt resource: learning from Australia and elsewhere'. (Ed. J Walker) pp. 1-26. (Wood Technology Research Centre, University of Canterbury: Christchurch, New Zealand)
- Potts, BM., 2004.** Genetic Improvement of Eucalypts. In 'Encyclopedia of Forest Science'. (Eds J Burley, Evans J and Youngquist JA) pp. 1480-1490. (Elsevier Science: Oxford)
- Potts, BM, Dungey, HS., 2004.** Interspecific hybridization of *Eucalyptus*: key issues for breeders and geneticists. *New Forests* 27, 115-138.

Potts, BM, McGowen, MH, Williams, DR, Suitor, S, Jones, TH, Gore, PL, Vaillancourt, RE., 2008. Advances in reproductive biology and seed production systems of *Eucalyptus*: the case of *Eucalyptus globulus*. Southern Forests 70, 145-154.

Potts, BM, Vaillancourt, RE, Jordan, GJ, Dutkowski, GW, Costa e Silva, J, McKinnon, GE, Steane, DA, Volker, PW, Lopez, GA, Apiolaza, LA, Li, Y, Marques, C, Borralho, NMG., 2004. Exploration of the *Eucalyptus globulus* gene pool. *Eucalyptus* in a changing world. Aveiro, Portugal. (Eds NMG Borralho, Pereira JS, Marques C, Coutinho J, Madeira M and Tomé M) pp. 46-61. (RAIZ, Instituto Investigação de Floresta e Papel)

Pryor, LD, Johnson, LAS., 1971. A classification of the Eucalypts. (Australian National University Press: Canberra)

Raymond, C., 2000. Tree breeding issues for solid wood production. The Future of Eucalypts for Wood Products. IUFRO International Conference. Launceston, Tasmania. Australia pp. 265-270

Raymond, CA., 2002. Genetics of *Eucalyptus* wood properties. Annals of Forest Science 59, 525-531.

Raymond, CA, MacDonald, AC., 1998. Where to shoot your pilodyn: within tree variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. New Forests 15, 205-221.

Raymond, CA, Schimleck, LR., 2002. Development of near infrared reflectance analysis calibrations for estimating genetic parameters for cellulose content in *Eucalyptus globulus*. Canadian Journal of Forest Research 32, 170-176.

Raymond, CR, Apiolaza, LA., 2004. Incorporating wood quality and deployment traits in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. In 'Plantation forest biotechnology for the 21st century'. (Eds C Walter and Carson M) pp. 87-99. (Forest Research New Zealand: Rotorua, New Zealand)

Resende, MDV, Resende, MFR, Jr., Sansaloni, CP, Petroli, CD, Missiaggia, AA, Aguiar, AM, Abad, JM, Takahashi, EK, Rosado, AM, Faria, DA, Pappas, GJ, Jr., Kilian, A, Grattapaglia, D., 2012. Genomic selection for growth and wood quality in *Eucalyptus*: capturing the missing heritability and accelerating breeding for complex traits in forest trees. New Phytologist 194, 116-128.

Rigault, P, Spokevicius, A, Merchant, A, Najera, J, Tibbits, J., 2012. Generation of a *Eucalyptus globulus* reference genome and gene catalogue. Abstracts of Plant and Animal Genome (PAG) 2012 conference, January 14-18, 2012, Chapter 1 P0522 San Diego, CA, USA

Sanhueza, R, Griffin, AR., 2001. FAMASA Fiber Yield Improvement Programme (F.Y.I.P.): 10 years experience breeding *Eucalyptus globulus*. Developing the Eucalypt of the Future. IUFRO International Symposium. (Ed. S Barros). (INFOR, Chile)

Sansaloni, C, Petroli, C, Jaccoud, D, Carling, J, Detering, F, Grattapaglia, D, Kilian, A., 2011. Diversity Arrays Technology (DArT) and next-generation sequencing combined: genome-wide, high throughput, highly informative genotyping for molecular breeding of *Eucalyptus*. BMC Proceedings 5(Suppl 7) P54.

Schimleck, LR, Kube, PD, Raymond, CA., 2004. Genetic improvement of kraft pulp yield in *Eucalyptus nitens* using cellulose content determined by near infrared spectroscopy. Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere 34, 2363-2370.

Sexton, TR, Henry, RJ, Harwood, CE, Thomas, DS, McManus, LJ, Raymond, C, Henson, M, Shepherd, M., 2012. Pectin methylesterase genes influence solid wood properties of *Eucalyptus pilularis*. Plant Physiology 158, 531-541.

Soria, F, Borralho, NMG., 1998. The genetics of resistance to *Phoracantha semipunctata* attack in *Eucalyptus globulus* in Spain. Silvae Genetica 46, 365-369.

Southerton, SG, MacMillan, CP, Bell, JC, Bhuiyan, N, Downes, G, Ravenwood, IC, Joyce, KR, Williams, D, Thumma, BR., 2010. Association of allelic variation in xylem genes with wood properties in *Eucalyptus nitens*. Australian Forestry 73, 259-264.

Stackpole, D, Joyce, K, Potts, BM, Harwood, C., 2010a. Correlated response of pulpwood profit traits following differential fertilization of a *Eucalyptus nitens* clonal trial. New Zealand Journal of Forestry Science 40, 173-183.

- Stackpole, D, Vaillancourt, R, Alves, A, Rodrigues, J, Potts, B., 2011.** Genetic variation in the chemical components of *Eucalyptus globulus* wood. *G3: Genes, Genomes, Genetics* 1, 151-159
- Stackpole, DJ, Vaillancourt, RE, de Aguilar, M, Potts, BM., 2010b.** Age trends in genetic parameters for growth and wood density in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics and Genomes* 6, 179-193.
- Stackpole, DJ, Vaillancourt, RE, Downes, GM, Harwood, CE, Potts, BM., 2010c.** Genetic control of kraft pulp yield in *Eucalyptus globulus*. *Canadian Journal of Forest Research* 40, 917-927.
- Steane, DA, Conod, N, Jones, RC, Vaillancourt, RE, Potts, BM., 2006.** A comparative analysis of population structure of a forest tree, *Eucalyptus globulus* (Myrtaceae), using microsatellite markers and quantitative traits. *Tree Genetics & Genomes* 2, 30-38.
- Steane, DA, Nicolle, D, Sansaloni, CP, Petroli, CD, Carling, J, Kilian, A, Myburg, AA, Grattapaglia, D, Vaillancourt, RE., 2011.** Population genetic analysis and phylogeny reconstruction in *Eucalyptus* (Myrtaceae) using high-throughput, genome-wide genotyping. *Molecular Phylogenetics and Evolution* 59, 206-224.
- Thavamanikumar, S, McManus, LJ, Tibbits, JFG, Bossinger, G., 2011.** The significance of single nucleotide polymorphisms (SNPs) in *Eucalyptus globulus* breeding programs. *Australian Forestry* 74, 23-29.
- Thumma, BR, Baltunis, BS, Bell, JC, Emebiri, LC, Moran, GF, Southerton, SG., 2010a.** Quantitative trait locus (QTL) analysis of growth and vegetative propagation traits in *Eucalyptus nitens* full-sib families. *Tree Genetics & Genomes* 6, 877-889.
- Thumma, BR, Matheson, BA, Zhang, D, Meeske, C, Meder, R, Downes, GM, Southerton, SG., 2009.** Identification of a cis-acting regulatory polymorphism in a Eucalypt COBRA-like gene affecting cellulose content. *Genetics* 183, 1153-1164.
- Thumma, BR, Nolan, MR, Evans, R, Moran, GF., 2005.** Polymorphisms in cinnamoyl CoA reductase (CCR) are associated with variation in microfibril angle in *Eucalyptus spp.* *Genetics* 171, 1257-1265.
- Thumma, BR, Southerton, SG, Bell, JC, Owen, JV, Henery, ML, Moran, GF., 2010b.** Quantitative trait locus (QTL) analysis of wood quality traits in *Eucalyptus nitens*. *Tree Genetics & Genomes* 6, 305-317.
- Tibbits, W, Hodge, G., 1998.** Genetic parameters and breeding value predictions for *Eucalyptus nitens* wood fiber production traits. *Forest Science* 44, 587-598.
- Tibbits, WN., 2000.** Evaluation of hybrids with *Eucalyptus nitens*. In 'Hybrid Breeding and Genetics of Forest Trees. Proceedings of QFRI/CRC-SPF Symposium, 9-14th April 2000 Noosa, Queensland, Australia'. (Eds HS Dungey, Dieters MJ and Nikles DG) pp. 363-372. (Department of Primary Industries: Brisbane)
- Tibbits, WN, Boomsma, DB, Jarvis, S., 1997.** Distribution, biology, genetics, and improvement programs for *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* around the world. 24th Southern Forest Tree Improvement Conference. Orlando, Florida. (Eds T White, Huber D and Powell G) pp. 1-15. (Southern Tree Improvement Committee)
- Tibbits, WN, Hodge, GR., 2003.** Genetic parameters for cold hardiness in *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden. *Silvae Genetica* 52, 89-97.
- Toro, MA, Silió, L, Rodriguez, MC, Soria, F, Toval, G., 1998.** Genetic analysis of survival to drought in *Eucalyptus globulus* in Spain. 6th World Congress on Genetics Applied to Livestock Production. Armidale, Australia pp. 499-502
- Turner, CH, Balodis, V, Dean, GH., 1983.** Variability in pulping quality of *E. globulus* from Tasmanian provenances. *Appita* 36, 371-376.
- Varmola, M, Del Lungo, A., 2003.** Planted forests database (PFDB): structure and contents. Forest Resources Development Service, Forest Resources Division, Forestry Department, FAO, Working paper FP/25, Rome, Italy.

Vega Alonso, G, Toval Hernandez, G, Basurco Garcia-Casal, F, Rodriguez Soalleiro, R., 1994. Early growth of 260 families of *Eucalyptus globulus* in North Spain. *Eucalyptus for Biomass Production*. Lisbon, Portugal. (Eds J Pereira and Pereira H) pp. 115-132. (Commission of the European Communities)

Volker, PW, Dean, CA, Tibbits, WN, Ravenwood, IC., 1990. Genetic parameters and gains expected from selection in *Eucalyptus globulus* in Tasmania. *Silvae Genetica* 39, 18-21.

Volker, PW, Orme, RK., 1988. Provenance trials of *Eucalyptus globulus* and related species in Tasmania. *Australian Forestry* 51, 257-265.

Volker, PW, Potts, BM, Borralho, NMG., 2008. Genetic parameters of intra- and inter-specific hybrids of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*. *Tree Genetics & Genomes* 4, 445-460.

Washusen, R., 2004. Processing pruned and unpruned *Eucalyptus globulus* managed for sawlog production to produce high value products. Australian Government, Forest and Wood Products Research and Development Corporation, PN03.1315, Melbourne, Victoria.

Washusen, R, Harwood, C, Morrow, A, Northway, R, Valencia, JC, Volker, P, Wood, M, Farrell, R., 2009. Pruned plantation-grown *Eucalyptus nitens*: Effect of thinning and conventional processing practices on sawn board quality and recovery. *New Zealand Journal of Forestry Science* 39, 39-55.

Whiteman, PH, Cameron, JN., 1989. Status of APM forests Eucalypt breeding programmes in Gippsland, Victoria, Australia. In 'Breeding Tropical Trees: Population structure and genetic improvement strategies in clonal and seedling forestry. Proceedings of the IUFRO conference, Pattaya, Thailand, November 1988'. (Eds GL Gibson, Griffin AR and Matheson AC) pp. 428-430. (Oxford, United Kingdom; Arlington, Virginia, USA: Oxford Forestry Institute; Winrock International)

Whiteman, PH, Cameron, JN, Farrington, A., 1996. Breeding trees for improved pulp and paper production - a review. *Appita Journal* 49, 50-53.

Whittock, SP, Dutkowski, GW, Greaves, BL, Apiolaza, LA., 2007. Integrating revenues from carbon sequestration into economic breeding objectives for *Eucalyptus globulus* pulpwood production. *Annals of Forest Science* 64, 239-246.

Whittock, SP, Greaves, BL, Apiolaza, LA., 2004. A cash flow model to compare coppice and genetically improved seedling options for *Eucalyptus globulus* pulpwood plantations. *Forest Ecology and Management* 191, 267-274.

Williams, DR, Potts, BM, Black, PG., 1999. Testing single visit pollination procedures for *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*. *Australian Forestry* 62, 346-352.

Wood, MJ, McLarin, ML, Volker, PW, Syme, M., 2009. Management of Eucalypt plantations for profitable sawlog production in Tasmania, Australia. *Tasforests* 18, 117-130.

Woolaston, RR, Whiteman, PH, Cameron, JN., 1991. Genetic analyses of four year diameter measures for *Eucalyptus globulus* growing across four sites in Victoria, Australia. *Intensive Forestry: The Role of Eucalypts*. Proceedings of the IUFRO symposium, P2.02-01 Productivity of Eucalypts,. Durban, South Africa. (Ed. APG Schönauf) pp. 371-381. (Southern African Institute of Forestry, Pretoria)

Yeoh, SH, Bell, JC, Foley, WJ, Wallis, IR, Moran, GF., 2012. Estimating population boundaries using regional and local-scale spatial genetic structure: an example in *Eucalyptus globulus*. *Tree Genetics & Genomes* 8, 695-708.

Zang, D, Wang, H, You, Y., 1995. Performance and selection of a 4-year *Eucalyptus globulus* seedling seed orchard in Yunnan, China. *Eucalypt Plantations: Improving Fibre Yield and Quality*. Hobart, Tasmania. (Eds BM Potts, Borralho NMG, Reid JB, Cromer RN, Tibbits WN and Raymond CA) pp. 226-229. (CRC for Temperate Hardwood Forestry)



23. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS EN LA REGION ANDINA DE COLOMBIA

Víctor M. Nieto R.¹

Byron Urrego

Rubén Darío Castaño

Raúl Jaime Hernández

Nélida Faride Torres R.

Ximena Alexandra Laverde B.

INTRODUCCIÓN

En Colombia existen pocas referencias sobre el cultivo de los eucaliptos, aun así es posible documentar al menos cinco especies de este género, utilizadas de manera frecuente por los reforestadores del país, que por ahora están generando una alternativa evidente y con potencial para ser empleadas industrialmente en la producción de madera y en proyectos silvopastoriles (Obregón, 2009). El proceso de introducción de estas especies se remonta a épocas de la Colonia, cuando material de este género fue utilizado en la región andina central para alindar los nuevos predios, resultado de la campaña libertadora, o como especie ornamental o fuente de leña para uso doméstico. Desde entonces su empleo ha estado restringido a unas pocas regiones, donde las especies utilizadas han tenido un escaso o nulo manejo, llegando a generar bosques muy degradados, con excepción de las plantaciones industriales generadas por la empresa privada.

Iniciando el siglo XX, este género se empleó en la recuperación de áreas erosionadas y en la protección de algunas fuentes de acueductos, razón por la cual es común encontrar muchas especies de eucaliptos alrededor de ciudades como Bogotá, dentro de zonas de reserva ambiental. No obstante esta falta de seguimiento para lograr el desarrollo ideal de los eucaliptos, hoy en día es posible encontrar individuos o áreas con muy buenas características en desarrollo y sanidad, debido muy seguramente a las favorables condiciones ambientales y el largo periodo de tiempo al cual estos árboles han estado sometidos a presiones ambientales de selección.

En Colombia, los primeros ensayos organizados con eucaliptos se iniciaron en la década de los 60 como resultado de la Ley N° 23 de 1963, por la cual se adoptan varias áreas como zonas protectoras de los recursos hídricos y de reserva forestal en el país, dando así origen a las primeras plantaciones experimentales que también, en muchos casos, fueron abandonadas hasta convertirse en áreas no manejadas.

A principios de los años 70 se establecieron nuevas plantaciones, esta vez comerciales, destinadas a suplir las necesidades de materia prima de la industria papelera, principalmente con las especies *Eucalyptus grandis* y *E. saligna* en los departamentos de Antioquia, Valle del Cauca y Cauca. Estas primeras áreas manejadas sirvieron como unidades de investigación para evaluar la adaptación, propiedades de la madera, servicios y rentabilidad de varias especies en suelos colombianos. En esto intervino favorablemente la empresa privada e

1 Ingeniero Forestal. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF). Bogotá, Colombia. vnieto@conif.co.

INDERENA como empresa del Estado. Desde entonces y hasta ahora, más de 21 especies de eucaliptos han sido estudiadas en el país, dando algunos buenos resultados, en términos de productividad y rendimiento industrial (Obregón, 2009).

En Colombia es posible encontrar hoy en día operativamente cinco o seis especies de eucaliptos del subgénero *Symphyomyrtus*, muchas de las cuales han sido ampliamente plantadas en el mundo (Cuadro N° 1), que han sido evaluadas y sembradas en extensiones significativas con relación al área plantada en el país. Aunque los procesos para su identificación como especies promisorias han sido muy similares, muchas se detallarán dentro de este texto. Actualmente es posible encontrar las siguientes especies: *Eucalyptus grandis* en la zona Andina, valle central del río Cauca; *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus camaldulensis*, en la región de la Costa Atlántica en regiones con escasa precipitación y suelos pobres; *Eucalyptus globulus*, en la región Andina, altiplano cundiboyacense, en áreas con suelos profundos y buenos regímenes de precipitación, y *Eucalyptus pellita*, en las sabanas de los Llanos Orientales sobre suelos pobres y con alto contenido de aluminio. Recientemente se ha iniciado la introducción de híbridos como *E. urograndis*, principalmente en la zona Andina y en el departamento de Córdoba, al norte del país.

Cuadro N° 1
CONDICIONES AMBIENTALES DE ALGUNAS ESPECIES DE *Eucalyptus*
IMPORTANTES PARA LAS PLANTACIONES FORESTALES EN EL MUNDO

Especies	Clima	Latitud (°S)	Precipitación (mm/año)	Altitud (msnm)
<i>E. pellita</i>	Tropical	6 -15	1000 -1400	50 - 600
<i>E. urophylla</i>	Tropical	8 -10	800 -1500	180 - 3000
<i>E. grandis</i>	Subtropical	18 - 33	690 - 2480	0 - 600
<i>E. dunnii</i>	Subtropical	28 - 30	740 -1697	300 - 790
<i>E. camaldulensis</i>	Tropical/Templado	12 - 38	200 -1100	0 - 580
<i>E. globulus</i>	Templado	38 - 43	500 -1500	0 - 600
<i>E. nitens</i>	Templado	31 - 37	600 -1500	640 - 1510
<i>E. benthamii</i>	Templado	33 - 34	750 - 850	0 - 150

(Fuente: Dvorak, 2012)

Los usos para este tipo de especies son muy variados, van desde madera para minas de carbón (en socavón) hasta tutores para cultivos agrícolas como arveja o frijol. De igual manera, el eucalipto en Colombia ha sido muy utilizado como postes para conducción eléctrica, principalmente para los sectores rurales.

En Colombia, el área total con plantaciones forestales comerciales se estima en unas 328.000 ha al 2005 (453 mil hectáreas reportadas por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural-MADR a diciembre de 2012), una cifra relativamente pequeña comparada con otros países de la región como Brasil (más de 5 millones de hectáreas), Chile (2.5 millones de hectáreas), Argentina (1.2 millones de hectáreas), Venezuela (627 mil hectáreas) y ahora Uruguay que ha entrado rápidamente al mercado forestal (más de 700 mil hectáreas, la mayoría de eucalipto). La cifra reportada para Colombia, aún es de mayor análisis al identificar que dentro de las estadísticas existe un sinnúmero de especies que también se plantan y, por lo tanto, no todo el reporte es dado a los eucaliptos (FAO, 2006).

Los eucaliptos en Colombia han mostrado tener un alto potencial productivo y dadas las estimaciones de más de 17 millones de hectáreas de suelos con aptitud forestal del país, se concluye que las posibilidades podrían ser muchas. Para avanzar en esto, el Gobierno de Colombia ha destinado en el año 2013 una cifra cercana a los 100 mil millones de pesos (50 millones de dólares), a través del Certificado de Incentivo Forestal-CIF, para el establecimiento de nuevas plantaciones.

El bajo crecimiento del área plantada con eucaliptos en Colombia puede ser atribuido a varios factores, dentro de los cuales se pueden enumerar la falta de conocimiento técnico del cultivo así como de la industrialización de este tipo de madera; la existencia, aunque cada vez más reducida, de maderas alternativas provenientes del bosque natural, de mayor valor en el mercado por vetado o densidad; algunas tendencias ambientalistas contra los eucaliptos; y tal vez la más determinante, la falta de una integración entre oferta ambiental y demanda industrial de las especies potenciales.

Dentro de los factores limitantes también se encuentra la dificultad de acceso al recurso genético apropiado y de programas de mejoramiento genético aplicados y dimensionados en el tiempo. En la actualidad solo una empresa industrial posee este tipo de programas, serio y estructurado en el tiempo. La alternativa ha sido entonces el uso de semilla no mejorada, para lo cual se ha buscado mejorar el acceso al menos a fuentes caracterizadas de semilla. En el Cuadro N° 2 se indica algunas de las fuentes semilleras reconocidas en el país para las especies de *Eucalyptus*.

Según Trujillo (2011), con las fuentes semilleras que actualmente existen en Colombia es posible cumplir una meta de reforestación de 51.000 ha/año (teniendo en cuenta otras especies como teca, melina, pinos, acacia, ceiba roja y ciprés).

No obstante, la búsqueda de material genético de calidad que requieren los reforestadores es un proceso minucioso, a largo plazo, y necesita profesionales genetistas interesados en el mejoramiento de las especies comerciales.

Pese a estos esfuerzos y oportunidades para lograr la consolidación del sector forestal, muchas de las iniciativas aún no logran materializarse, dado que se carece de un planteamiento claro de negocio maderero, donde los eucaliptos tienen múltiples oportunidades por su alta plasticidad en productos, mercados y condiciones de crecimiento.

En Colombia, el eucalipto hoy en día hace parte importante de la industria maderera para la repoblación de áreas, debido a sus múltiples ventajas en crecimiento y adaptación, y por su capacidad de reproducirse para un segundo ciclo a partir de los rebrotes de los árboles talados, favoreciendo así la sostenibilidad de los proyectos.

Cuadro N° 2
FUENTES SEMILLERAS RECONOCIDAS EN EL PAÍS
PARA EL SUMINISTRO DE SEMILLAS

Especie	Lugar de Provisión	Tipo de Fuente Semillera	Propietario	Capacidad Producción Estimada (kg/año)
<i>E. globulus</i>	Parque La Florida, sabana de Bogotá	Huerto semillero, no validado	Instituto Distrital de Recreación y Deporte-IDRD	20
<i>E. grandis</i>	Suroccidente, Cauca	Diferentes fuentes genéticas	Smurfit Kappa Cartón de Colombia	30 Instituto Colombiano Agropecuario-ICA aprobó importaciones nuevas
<i>E. urograndis</i>	No reporta, la mayoría de semilla se importa de Brasil	Desconocida, varias	Desconocido	No reportado
<i>E. pellita</i>	Villanueva, Casanare	Rodal semillero	Reforestadora de la Costa-Refocosta SAS	Variable
<i>E. tereticornis</i>	Costa Atlántica	Rodales semilleros comerciales. Áreas productoras de semilla Huerto semillero clonal Jardín clonal (280 clones adaptados)	Reforestadora San Sebastián-RESS SA	50
		Rodal semillero	Reforestadora de la Costa-Refocosta SAS	No cosecha

(Fuente: Trujillo, 2011)

En términos generales, se estima que el rendimiento de los eucaliptos en Colombia puede estar entre los 16 y 25 m³/hectárea/año en promedio.

Este documento trata de puntualizar el estado actual de este género en Colombia, contextualizado en las condiciones que han llevado a esta situación, algunas exitosas y otras veces con resultado más del azar, y de la excelente oferta ambiental que algunas regiones en particular ofrecen a cada especie, más que en una planificada introducción y aprovechamiento.

Las especies, condiciones y oportunidades de Colombia podrían estructurarse por especie, región o actor motivador de cambio.

REGIÓN ANDINA, *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus urophylla* EMPRESA FORESTAL SMURFIT KAPPA CARTÓN COLOMBIA - SKCC

La especie con mayor área plantada de eucaliptos está en manos de la empresa Smurfit Kappa Cartón de Colombia, empresa líder en la investigación forestal en Colombia y una de las entidades que con mayor acierto ha abordado la introducción y el manejo de los eucaliptos en el país.

Su objetivo comercial ha estado ligado a la obtención de fibras cortas como materia prima para la producción de papel basado en la utilización de diferentes especies de eucalipto,

principalmente *Eucalyptus grandis* y, más recientemente, el híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* “urograndis”.

El proyecto forestal de Cartón Colombia, en su mayoría está localizado en la zona suroccidental del país y tiene como objetivo desarrollar plantaciones forestales que permitan mantener el suministro oportuno de materia prima para sus procesos industriales. El uso de varias especies de eucalipto le permite asegurar esta provisión por varias razones, entre las que se destacan: las propiedades de sus fibras, el rápido crecimiento en las condiciones ambientales de los sitios de plantación, la posibilidad de manejo de sus demandas nutricionales y su rápida respuesta a la aplicación de fertilizantes, la alta capacidad de adaptación a suelos de baja fertilidad y de propiedades físicas difíciles, y la alta adaptabilidad a diferentes altitudes y climas.



Figura N° 1
PLANTACIONES DE *Eucalyptus grandis* de SKCC

El área de influencia del proyecto forestal de SKCC la conforman una gran cantidad de predios localizados en varios departamentos del país, los cuales presentan una alta variabilidad de ambientes y topografía, que se reflejan a su vez en diferentes unidades de suelos (64 unidades y 4 grupos, dentro de los que están *volcanic* 62%, *Basaltic* 23%, *Ultisols* 9% y *Alfisols* 6%) y contrastes de regímenes climáticos que van desde los 1.000 a los 2.600 msnm, lo cual ha generado un permanente interés de la compañía por identificar los mejores materiales para cada sitio. El proceso de selección parte del establecimiento de *arboretums* de evaluación y posteriormente la identificación de especies de interés, las cuales son plantadas en sitios representativos con potencial reforestador y se las evalúa en supervivencia, crecimiento y forma, para llegar a seleccionar unas pocas especies que son objeto de los programas de mejoramiento genético.



Figura N° 2
PANORÁMICA PLANTACIONES JÓVENES *Eucalyptus grandis*
EN SMURFIT KAPPA CARTÓN DE COLOMBIA

Los parámetros evaluados para la selección y catalogación del material vegetal utilizado en los programas de plantación son volumen, forma, densidad de la madera, crecimiento y tolerancia a enfermedades, entre otros, sobre la base de los cuales se clasifica la productividad en cada sitio. Para lograrlo, la compañía posee un área dedicada a la investigación, estructurada en tres divisiones: Mejoramiento genético, Silvicultura y productividad (nutrición forestal y manejo de plantaciones) y Protección fitosanitaria. Entre el periodo de 1971 y 1990 la División de Investigación de SKCC ha evaluado en *arboretums* más de 47 especies de eucalipto en diferentes zonas del centro, sur y costa norte del país.

Dentro de los esquemas de investigación para lograr y mantener el liderazgo en su gestión, SKCC realiza evaluaciones en hibridación entre *E. urophylla* y *E. grandis* para buscar características complementarias de ambas especies, tales como mayor tolerancia a enfermedades (*E. urophylla*) y mejor forma (*E. grandis*); desarrolla el tercer ciclo de mejoramiento de *E. grandis* para ampliar la base genética, generar parámetros genéticos, servir de población base para la próxima generación y crear fuente de semilla y clones; y evalúa la interacción clon-sitio para *E. grandis*, entre otras investigaciones. El objetivo final de todo el programa es lograr mayor diferencial de conversión por hectárea en fibra y menos en lignina, que con datos preliminares puede estar en 31 toneladas de fibra por hectárea a partir de material clonal y 29 toneladas a partir de material procedente de semilla.

En SKCC se resalta el agresivo y acertado programa de propagación clonal de eucaliptos, utilizando modelos hidropónicos para la sustentación de las plántulas y aplicando protocolos de micro-estaquillado (Figura N° 3). Esta innovación en la producción de vivero, replicada ahora en muchas empresas nacionales y en otras especies forestales, le ha permitido a SKCC aprovechar las posibilidades en la caracterización y optimización de la producción que el esquema clonal proporciona para lograr plantaciones más homogéneas, con una valoración de rendimiento reconocida.



Figura N° 3
ÁREAS DE PROPAGACIÓN CLONAL HIDROPÓNICA EN EL VIVERO RANCHO GRANDE
DE SMURFIT KAPPA CARTÓN DE COLOMBIA

La superficie plantada en el proyecto forestal de SKCC es de 16.295 ha reportadas al 31 de diciembre de 2012, con una edad promedio de 8 años, las cuales son detalladas en el Cuadro N° 3.

Cuadro N° 3
SUPERFICIE PLANTADA DE EUCALIPTOS EN LA EMPRESA SKCC
AL 31 DE DICIEMBRE DE 2012, CLASIFICADAS POR ORIGEN DEL MATERIAL

Especie	Origen	Superficie (ha)
<i>E. grandis</i>	Semilla	6.870
<i>E. grandis</i>	Clon	8.110
<i>E. urograndis</i>	Clon	1.263
<i>E. urograndis</i>	Semilla	52
Total		16.295

A futuro, Cartón Colombia planea en los próximos cinco años incorporar 5.000 ha adicionales, de las cuales aproximadamente el 80% provendría de material clonal, a un ritmo de 1.000 ha anuales.



Figura N° 4
VIVERO RANCHO GRANDE DE PROPIEDAD DE SMURFIT KAPPA
CARTÓN DE COLOMBIA

Los rendimientos anuales alcanzados en eucalipto por SKCC, gracias a sus programas de investigación y propagación, de acuerdo con los resultados de 2012, son de 31 t/ha/año (44,3 m³/ha/año) con material clonal y de 29 t/ha/año (41,4 m³/ha/año) para material proveniente de semilla. Los análisis y proyecciones del programa de investigación permiten estimar que la productividad puede aumentar en un 10% para los próximos cinco años.

Un punto importante dentro del manejo de plantaciones de eucalipto en la región tropical de Colombia es el control de malezas, principalmente en las primeras etapas de crecimiento mientras los árboles logran el cierre de copas. Para esto es necesario controlar los recursos agua y nutrientes, que deben ser ajustados para cada sitio en particular. Otro aspecto relevante es el manejo nutricional de las plantaciones.



Figura N°5
PLANTACIONES DE *Eucalyptus grandis*

Por último, es importante mencionar que el programa de reforestación comercial de SKCC indirectamente está protegiendo más de 29.944 ha de bosques naturales, que son conservados como áreas amortiguadoras y relictos de vegetación, contribuyendo así con el programa de manejo integrado de plagas; además, sirve de umbral de protección a la flora y

la fauna local y como mecanismo de apoyo a salvaguardar los cauces de las quebradas y las áreas de abastecimiento de acueductos locales.

La madera de *E grandis* es usada para celulosa así como en la fabricación de ensambles, triplex, entrepaños, la construcción de botes, pisos, postes para alambrado, puntales en minas y postes de cercas, aunque muchos de estos usos en el orden local aún no han sido implementados industrialmente en Colombia.

ZONA CENTRAL DEL ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE, *Eucalyptus globulus*

El *Eucalyptus globulus* es una de las especies forestales con mayor difusión en el mundo. En Colombia hay 4.107 ha plantadas comercialmente con esta especie. Naturalmente, *E. globulus* se distribuye en Tasmania, Victoria y Nueva Gales del Sur, entre los 31°S y los 43°S. Se reconocen cuatro subespecies: *Eucalyptus globulus ssp bicostata*, *E. globulus ssp globulus*, *E. globulus ssp maidenii* y *E. globulus ssp pseudoglobulus*.

En Colombia, se desarrolla bien entre los 2.000 y 3.000 msnm, en clima frío de los departamentos de Cundinamarca, Nariño y Boyacá. El altiplano cundiboyacense, localizado en la zona central del país, caracterizado por temperaturas entre los 15 - 20°C y con una altitud media de 2.600 msnm, ha sido la región ideal para el establecimiento de esta especie, la cual requiere épocas secas de hasta 3 meses y precipitaciones entre 500 y 1.500 mm, es susceptible a vientos fuertes y a heladas fuertes (Silva, 2007).

En el Altiplano cundiboyacense es posible encontrar los árboles de eucalipto de mayor edad del país, dado que las primeras plantaciones de *E. globulus* se dieron en época de La Colonia. De esta manera, *E. globulus* ha estado asociado al paisaje de la región a través de muchos años y ha sido fuente importante de leña para cocina y para la quema de alfarería, materia prima para postes de cercos, fuente de elementos para la minería de carbón de socavón (muy rica en la región) y más recientemente fuente de postes para alumbrado rural, y materia prima para la fabricación de cajonería y elementos estructurales en construcción y estructura de invernaderos para la industria de flores.

Pese a toda la importancia y uso asociado a la vida diaria de los habitantes de esta importante región, *E. globulus* no ha tenido el suficiente dinamismo ni manejo técnico que permita una optimización en su crecimiento. Por muchos años el eucalipto ha sido talado y sus rebrotes una y otra vez aprovechados sin renovación de la planta madre, trayendo como consecuencia pérdida en la capacidad de crecimiento y cepas de cosecha sobredimensionadas.

Los esfuerzos por el desarrollo de nuevas plantaciones han sido infructuosos y tan sólo en la década de los 80 el Instituto Nacional de los Recursos Naturales (INDERENA, liquidado por la Ley 99 de 1993) estimuló el establecimiento de plantaciones haciendo disponibles de manera gratuita plántulas para llevar a campo, acción que no fue implementada bajo ningún mecanismo en los años posteriores.



Figura N° 6
PAISAJE ASOCIADO A *Eucalyptus globulus* EN EL ALTIPLANO CUNDIBOYACENSE



Figura N° 7
**LÍNEAS DE CERCO VIVO Y REPETIDAS COSECHAS DE REBROTE ASOCIADO
 AL PAISAJE DE *E. globulus***

Actualmente en el país son diversos los productos maderables provenientes de *E. globulus*, tanto en madera rolliza como aserrada y para la producción de pulpa. Por otra parte, el área plantada con esta especie es pequeña y se disminuye gradualmente, por lo tanto se requiere el establecimiento de nuevas plantaciones comerciales con semilla genéticamente

mejorada que redunde en mayores rendimientos y aumente la calidad de la madera (Salas y Salazar, 2007. cit. por Salas, 2007).

Es así que una herramienta muy útil en la silvicultura son los programas de mejoramiento genético forestal cuyo objetivo es aumentar la productividad, adaptabilidad y rentabilidad de las plantaciones forestales (Balocchi, 2012).

INDERENA fue la primera institución que inició un programa de mejoramiento genético de *E. globulus*, estableciendo el único huerto semillero que tiene el país para la especie, con una alta diversidad genética. En este huerto denominado “La Florida”, están representada 158 familias procedentes de dieciocho lugares de Australia (Tasmania, Isla Flinders, Isla King e Isla Bruny) y Colombia (Cundinamarca, Boyacá y Nariño).

Esta labor fue retomada recientemente por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Smurfit Kappa Cartón de Colombia y la Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF), con el propósito de reiniciar un programa de mejoramiento genético para la especie, que proporcione semilla mejorada genéticamente para reforestación comercial.

Dada la diversidad de productos comercializados de la especie, como objetivo de mejoramiento se concibe maximizar la producción de madera para postes, madera aserrada y pulpa, por lo cual la selección se ha orientado hacia la obtención de árboles de fuste recto, limpio y cilíndrico, que alcancen alto volumen en respuesta a sus características genéticas (Salas, 2007).

Los resultados de esta iniciativa llegan ya al 5^{to} año de evaluación y sus conclusiones serán publicadas próximamente.

Huerto Semillero La Florida y Estrategias del Programa de Mejoramiento Genético

Salas (2007) propone un esquema para el programa de mejoramiento genético a partir del huerto semillero La Florida (Figura N° 9), el cual a pesar de haber sido afectado por interrupciones en el proceso de investigación, y tener influencias por una alta variabilidad ambiental, arroja selecciones importantes para la colección de la variabilidad genética de la especie en el país.

Se realizan selecciones de carácter fenotípico en el huerto la Florida, las cuales tienen utilidad en la determinación de una población temporal de producción y se inicia el proceso de evaluación de este material a partir del establecimiento de tres ensayos de procedencias y progenies, con los cuales se espera determinar la superioridad genética de las familias, de manera que se conforme la nueva población base del ciclo de mejoramiento para la especie.

Estos ensayos son establecidos en los municipios de Tuta, Santa Rosa y Firavitoba en Boyacá.

Una vez evaluados estos ensayos, se podrá concluir en términos genéticos cuáles son las mejores familias de las mejores procedencias, que conformarán la población de selección.

Los análisis permitirán realizar la depuración genética de los ensayos para la

conformación de huertos semilleros de polinización abierta, empleados como población de producción de primera generación. Los componentes de este primer ciclo de mejoramiento se muestran en la Figura N° 9.

Sin embargo, una estrategia de mejoramiento a corto plazo, busca hacer disponible semilla con algún grado de selección mientras los ensayos entran en fase de producción. Para esto se propone la identificación preliminar de un grupo de procedencias y familias sobresalientes dentro del Huerto La Florida. Estas constituyen la fuente inmediata de semilla para la reforestación comercial, tal como se muestra en la Figura N° 10.



Figura N° 8
RECOLECCIÓN DE SEMILLA, HUERTO SEMILLERO LA FLORIDA

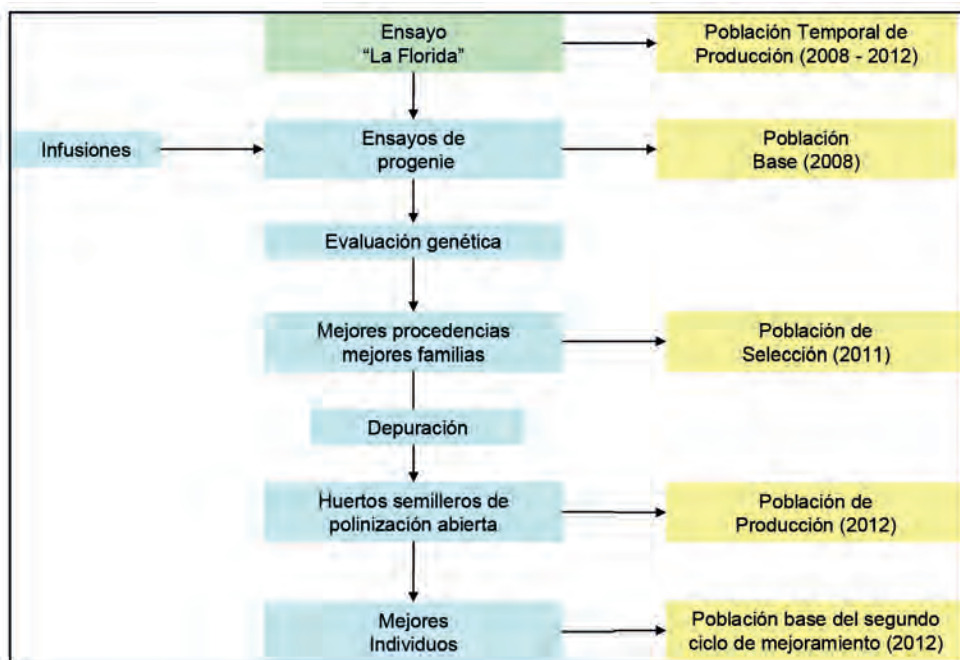
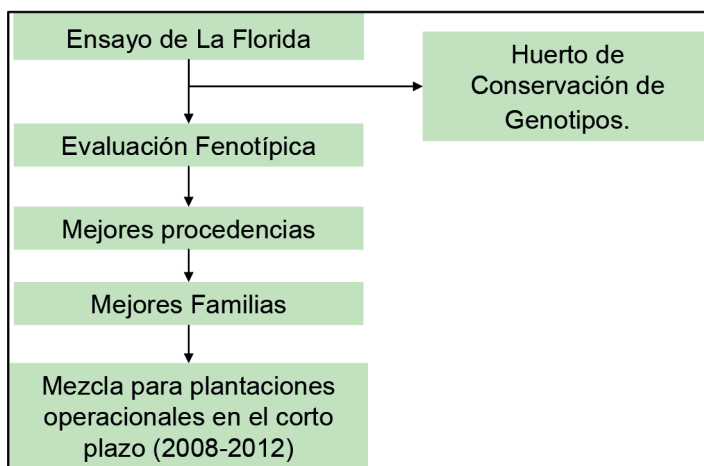


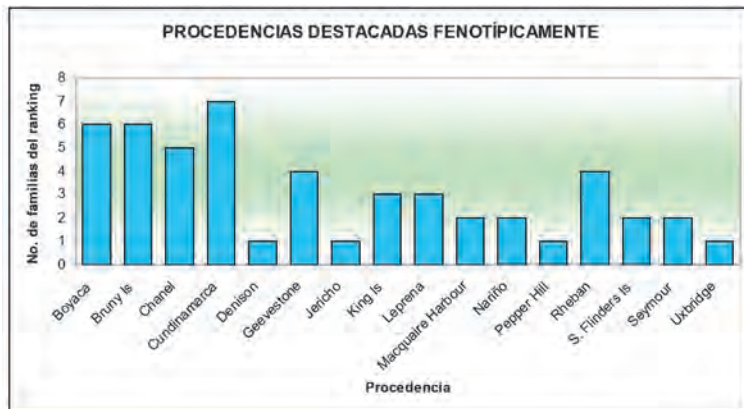
Figura N° 9
PRIMER CICLO PROPUESTO PARA EL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE *E. globulus* EN COLOMBIA, PROPUESTO POR SALAS (2007)



(Fuente: Salas, 2007)

Figura N° 10
ESTRATEGIA DE MEJORAMIENTO PARA EL CORTO PLAZO

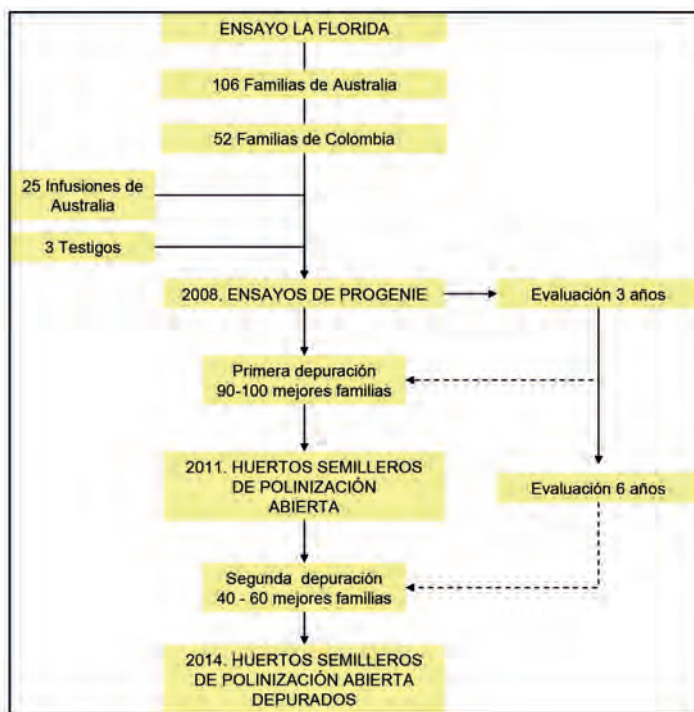
Como resultado de la evaluación fenotípica del huerto la Florida y teniendo en cuenta la variable volumen, Salas y Salazar, (2007 cit. por Salas, 2007), proponen las procedencias; Cundinamarca, Boyacá, Brunyls, Chanel, Geeveston, Rheban, King Island y Leprena, como las más apropiadas para ser utilizadas como fuente inmediata de semilla para la reforestación comercial (Figura N° 11).



(Fuente: Salas, 2007)

Figura N° 11
PROCEDENCIAS DESTACADAS FENOTÍPICAMENTE DENTRO DE LA COLECCIÓN
GENÉTICA ESTABLECIDA EN EL HUERTO SEMILLERO LA FLORIDA

La estrategia a mediano plazo, en la cual toma mayor relevancia la selección a nivel familiar e individual, se indica en Figura N° 12.



(Fuente: Salas, 2007)

Figura N° 12
ESTRATEGIA DE MEJORAMIENTO PARA EL MEDIANO PLAZO

Los ensayos de progenie y procedencia tienen el propósito de conformar la población base de mejoramiento, y han sido incluidas en un diseño de STP (*Single Tree Plot*) 186 familias; 106 familias de Tasmania y 52 familias de Cundinamarca, Boyacá y Nariño (presentes en el

ensayo La Florida), y 25 infusiones provenientes de los estados australianos de Tasmania y Nueva Gales del Sur, y tres testigos. La infusión de material australiano permitirá concluir a cerca del comportamiento de otras subespecies de *Eucalyptus globulus*, como *E. globulus ssp bicostata* y *E. globulus ssp maidenii*, las cuales reportan menores rendimientos que *E. globulus ssp globulus*, pero con grados de adaptación favorables a condiciones ambientales adversas.

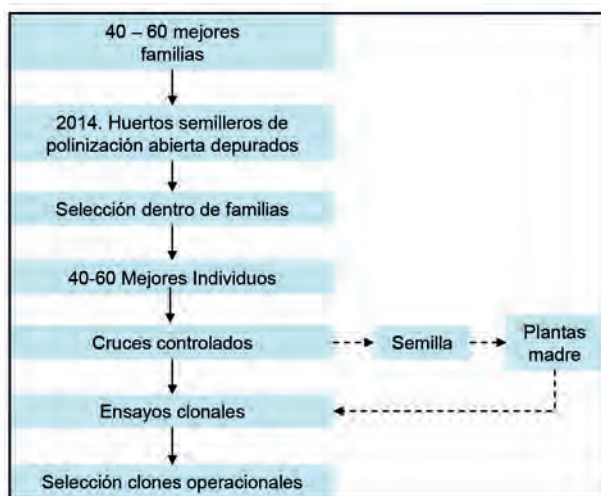
Las pruebas de progenie contribuyen a la determinación de las mejores fuentes de semillas para una determinada localidad, por tanto, los experimentos serán replicados sobre una escala de sitios representativos para la reforestación. Se planea establecer cinco réplicas de estos ensayos en áreas potenciales para reforestación comercial en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá.

Se plantea la depuración de los ensayos de progenie, con una primera depuración para la conformación de huertos semilleros de plantas de polinización abierta. Mediante la evaluación de tres años de las progenies, será posible determinar con base en parámetros genéticos, la heredabilidad de la superioridad a nivel familiar. Se ejecutará el raleo de una a dos réplicas de los ensayos, es decir, se eliminarán alrededor del 50% de las familias de menor desempeño y dejar en pie las mejores 90 a 100 familias, con lo cual se obtendrán huertos semilleros de plantas de polinización abierta que abastecerán la semilla para reforestación en el mediano plazo.

Una segunda depuración de huertos semilleros de polinización abierta en la que las réplicas de los ensayos de progenie que permanecen sin ralear, permitirán realizar mediciones anuales hasta, por lo menos, completar la edad del turno (10 años). Con la medición del año 6, se estimarán de nuevo los parámetros genéticos y se determinará un grupo de 40 a 60 mejores familias, las familias restantes se eliminarán de los huertos.

Finalmente, la estrategia a largo plazo corresponde a la proyección de los resultados obtenidos en el mediano plazo, su objetivo es asegurar ganancias continuas en los futuros ciclos de mejoramiento. Como resultado de las acciones implementadas en el mediano plazo, se espera obtener semilla mejorada genéticamente y en cantidad suficiente para la reforestación comercial a pequeña escala (menos de 2.000 ha/año).

Para acciones de reforestación a gran escala, la identificación de los individuos superiores de las mejores familias permitirá realizar cruza controladas, así la semilla obtenida posibilitará la producción de un conjunto de plantas madre, a partir de las cuales se establecerán ensayos clonales en diferentes calidades de sitio. La evaluación de estos estudios permitirá seleccionar los clones operacionales entre otras variables de interés comercial (Figura N° 13).



(Fuente: Salas, 2007)

Figura N° 13
ALTERNATIVA PROYECTOS A GRAN ESCALA

REFERENCIAS

- Balocchi C., 2012.** Bases genéticas del mejoramiento de árboles. Memorias: Curso Genética Forestal 2012. Chile
- FAO, 2006.** Tendencias y perspectivas del Sector Forestal en América Latina y El Caribe. Estudio FAO-Montes: 148. Roma, Italia. 178 p. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura-FAO
- Dvorak, W.S., 2012.** Potencial Forestal de las Especies de Hoja Ancha en los Trópicos y Subtrópicos. Camcore North Carolina State University. Curso Genética Forestal. Santiago de Chile
- Obregón, C. y Restrepo, N., 2009.** El eucalipto, una opción de alta rentabilidad. Edición 53 Revista El Mueble y la Madera. Septiembre – Noviembre 2009.
- Salas, M., 2007.** Programa de Mejoramiento Genético para *Eucalyptus globulus* en Colombia. Memorias Seminario "Evaluación y perspectivas de la reforestación comercial con *Eucalyptus globulus* en Colombia". Octubre 16 de 2007.
- Silva, L.J., 2007.** Silvicultura de *Eucalyptus globulus* Labill. Memorias Seminario "Evaluación y perspectivas de la reforestación comercial con *Eucalyptus globulus* en Colombia". Octubre 16 de 2007.
- Trujillo, E., 2011.** ¿Hay semillas para un millón de hectáreas comerciales? En: Revista el Mueble y la Madera. 72: 6-13.

24. MEJORAMIENTO GENÉTICO DE EUCALIPTOS EN LAS REGIONES DE LOS LLANOS ORIENTALES Y LA COSTA ATLÁNTICA DE COLOMBIA

Víctor M. Nieto R.¹
Hilario Bermúdez G.²
Ximena Laverde B.³

INTRODUCCIÓN

El cultivo del eucalipto en Colombia se inicia en la zona Andina desde la conformación de la República. Sobre esta región existe vasta experiencia y área plantada debido a que en el centro del país las precipitaciones están bien distribuidas, los suelos son relativamente buenos a muy buenos y a que la mayoría de la población en Colombia está asentada sobre la zona montañosa, por lo que existe buena disponibilidad de mano de obra para desarrollar los proyectos y generar mercado de consumo. Los eucaliptos en la Región Andina han estado favorecidos por programas intensos de investigación y fomento que el Estado desarrolló en el pasado y que la empresa privada ha implementado hoy en día; no obstante, tienen la fuerte limitante del tamaño de los predios. El hecho que exista tanta presión de uso, hace que esta región no pueda ser considerada para proyectos forestales grandes. Es así como en el país se empiezan a analizar la integración de otras regiones, que antes habían sido marginales o poco utilizadas, y surge entonces para Colombia dos nuevas fronteras forestales: la Orinoquia y la Costa Atlántica.

Estas dos regiones tienen sus propias limitantes y ventajas, que en conjunto han y están motivando el desarrollo de proyectos forestales de medianos a grandes. Sin embargo y a pesar de que no existe amplia experiencia para los eucaliptos en estas zonas, es posible referenciar dos o tres proyectos forestales de empresas privadas, que de forma muy focalizada han contribuido a generar información de referencia con miras a una potencial ampliación del área plantada. Dentro de estos proyectos resaltan las iniciativas de la Reforestadora de la Costa SAS-REFOCOSTA y de Reforestadora San Sebastián SA-RESS, las cuales son descritas en detalle más adelante y aportan una interesante base de análisis.

Unir estas dos regiones en un solo capítulo no es casual, se debe a muchas razones. Primero, de alguna manera el desarrollo forestal de las dos ha sido muy similar operativamente, hay una única empresa trabajando por muchos años en validar el modelo y hacerlo replicable; limitaciones operativas de acceso, mercados y tecnología, y restricciones de suelo parecidas (Orinoquia por suelos ácidos, y con poca materia orgánica y la Costa Atlántica con suelos salino sódicos y bajo nivel de fertilidad); y una comunidad marginada y necesitada de fuentes de empleo y alternativas productivas. Segundo, porque ambas zonas tiene la gran ventaja de un área disponible amplia y una topografía que permite la mecanización.

Dentro del análisis, es necesario tener presente que, desafortunadamente para

1 Ingeniero Forestal. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF). Colombia. victornieto@conif.org.co

2 Ingeniero Forestal. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF). Bogotá, Colombia. hbermudez@conif.co

3 Ingeniero Forestal. Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF). Bogotá, Colombia. xlaverde@conif.co

Colombia, ha tomado fuerza el concepto que existen muy pocas especies de eucaliptos por región. La costumbre ha encasillado a *Eucalyptus pellita*, como la única posibilidad para la Orinoquia, y a *Eucalyptus tereticornis* y *E. camaldulensis*, para la Costa Atlántica. En el pasado se llega a esta conclusión luego de evaluar un grupo de especies y encontrar los mejores índices de adaptación con estas especies. Sin embargo, la evaluación desde el punto de vista biológico y de mercado no puede darse por concluida, dado que los mercados son cambiantes y las tecnologías evolucionan, el proceso de evaluación y validación de especies es una tarea dinámica y permanente. Estas regiones poseen un amplio potencial que debe ser aprovechado y optimizado, para lo cual ambas zonas tienen aún mucho que ofrecer al país.

La investigación en mejora genética para *Eucalyptus tereticornis* parte en la Costa atlántica por la motivación de Don Guillermo Londoño (QEPD), gerente General de REFOCOSTA en los años 80 - 90. Su estrategia de mejora es simple y efectiva, y se fundamenta en los mismos principios del ganadero, la selección recurrente de ejemplares con características fenotípicas de superioridad. Plantaciones sucesivas de estas selecciones llevaron a individuos sobresalientes para la región, a través de plantaciones mono familiares o grupo muy acotados de familias. Esta estrategia fue aplicada de manera similar para otras especies como *Tectonia grandis* y *Eucalyptus pellita*, siendo de esta manera Don Guillermo un visionario de los procesos estructurados que se aplican hoy en día.

Este capítulo trata de recoger y resaltar estas experiencias para que sirvan de punto de partida a nuevas iniciativas de desarrollo, que contribuyan a generar bienestar a la sociedad a través del cultivo de los eucaliptos.

MAGDALENA BAJO, *Eucalyptus tereticornis*

La especie *Eucalyptus tereticornis* llegó al país a través del proyecto forestal de la Reforestadora San Sebastián S.A.-RESS, establecido en los municipios de San Sebastián y San Zenón, departamento de Magdalena, la que por 25 años ha demostrado la bondad de esta especie, al igual que la de *Eucalyptus camaldulensis*, logrando generar la suficiente base genética para la propagación sexual o asexual de ellas.

En los años recientes y gracias a una acción compartida entre la Reforestadora San Sebastián SA y Madeflex SA, con el apoyo financiero del Programa Colombia Forestal, se elaboró un plan de inversión para la ampliación del núcleo forestal de esta empresa en los departamentos de Magdalena, Atlántico y Cesar. Los logros del plan incluyen el paquete tecnológico para el establecimiento de plantaciones comerciales o de uso silvopastoril y maderero que favorece económica, social y ambientalmente a los ganaderos que también participan en el proyecto. (Obregón y Restrepo, 2009).

Algunos beneficios de las dos especies a la zona están dados por la generación de empleo, la protección de los suelos y mejores condiciones microambientales para el ganado (en arreglos silvopastoriles) que redundarán en la producción de carne de alta calidad. En términos forestales, alcanzan un rendimiento cercano a los 248 m³ por hectárea de madera aserrable en 14 años (con una Tasa Interna de Retorno estimada del 14,6% solo para la plantación forestal), con entresacas comerciales en los años 6 y 10 para la obtención de postes y la extracción de fibra (Obregón y Restrepo, 2009).



Figura N° 1
PLANTACIONES DE *Eucalyptus tereticornis*

La especie *E. tereticornis* ha sido plantada comercialmente en la región de la Costa Atlántica de Colombia debido a su rápido crecimiento y sus buenas características fenotípicas, que generan árboles excelentes para regiones con mediana y baja precipitación (entre 900 y 1.500 mm/año). Adicionalmente, está comprobado que la especie se adapta muy bien a las condiciones climáticas del Bosque Seco Tropical, características de la eco región del Magdalena Bajo (Figura N° 2).

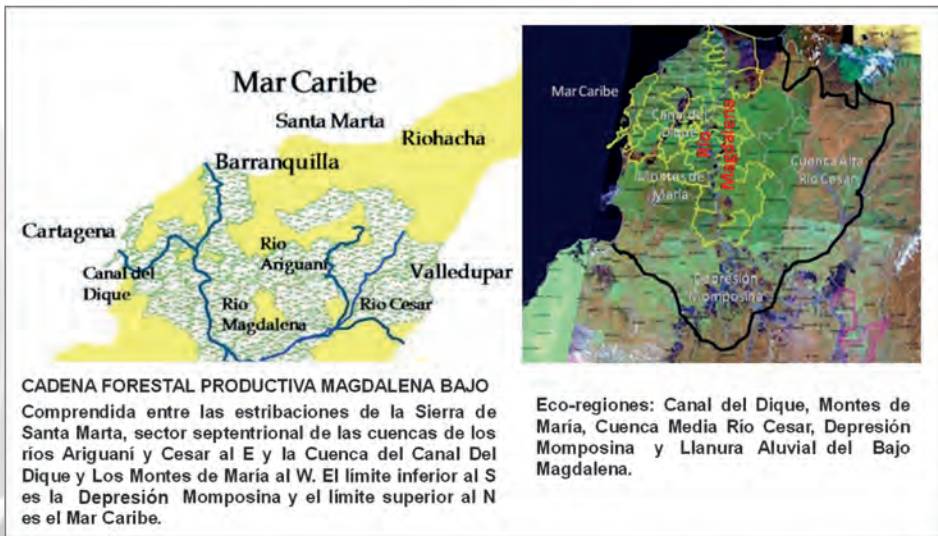


Figura N° 2
ECORREGIÓN DEL MAGDALENA BAJO DE COLOMBIA

En la zona hacen presencia diferentes entidades (Reforestadora San Sebastián SA, Madeflex SA, Refocosta SAS, Fondo de Inversión Forestal-LAEFEM, Monterrey Forestal Ltda., Pizano SA y otras empresas menores) las cuales han estado acumulando experiencia durante más de 25 años de actividad forestal, razón por la cual es posible afirmar que se tienen las bases del conocimiento para *Eucalyptus tereticornis* y *Eucalyptus camaldulensis* que permiten generar los fundamentos de un proceso de reforestación más amplio en área y alcances.

Las principales experiencias de la reforestación en la región permiten concluir que *E. tereticornis* se desarrolla bien en suelos profundos y fértiles de los valles aluviales húmedos, bien drenados, con buen contenido en nutrientes, prefiere pH alcalinos o ligeramente ácidos y de textura mediana. No tolera suelos pobremente drenados y es muy susceptible a inundaciones.

Las plantaciones que se desarrollan en suelos erosionados o compactados, de topografía quebrada y muy superficial, presentan características indeseables como fustes torcidos, poca altura, muy ramificados y con aspecto arbustivo.

En cuanto a clima, requiere de precipitaciones medias anuales entre 900 a 2.000 mm/año, siendo el óptimo más de 1.500 mm/año, se desarrolla en un rango de temperatura media de 24°C a 35°C, abarcando un rango altitudinal desde el nivel del mar hasta 1.000 msnm, por lo tanto, la especie se desarrolla en la zona de vida bosque seco tropical (bs-T). Es una especie heliófita y requiere de un periodo seco.

En Colombia, a la fecha se carece de un programa permanente y estructurado de mejoramiento genético para *E. tereticornis*.

El material genético disponible y los desarrollos en propagación de la especie han sido el resultado de acciones ejecutadas en el pasado por RESS, por lo tanto, la principal fuente de semilla disponible en el país se encuentra en predios de esta empresa.

Actualmente, RESS cuenta con dos proyectos semilleros:

- Proyecto Álamos: Constituido por nueve fincas ubicadas en los municipios de San Sebastián y San Zenón, departamento de Magdalena, con coordenadas 9°18' N, y 74°16' W, a 30 msnm, y 9°18' N y 74°20' W, a 25 msnm, respectivamente.
- Proyecto Terranova: Conformado por dos fincas localizadas en los municipios de Santa Ana y Pijiño del Carmen, departamento de Magdalena, con coordenadas 9°26' N y 74°21' W, a 75 msnm.

En la finca Álamos se concentran principalmente las fuentes de semilla en un grupo de áreas donde se pueden encontrar rodales semilleros comerciales, áreas productoras de semillas y un huerto semillero clonal.

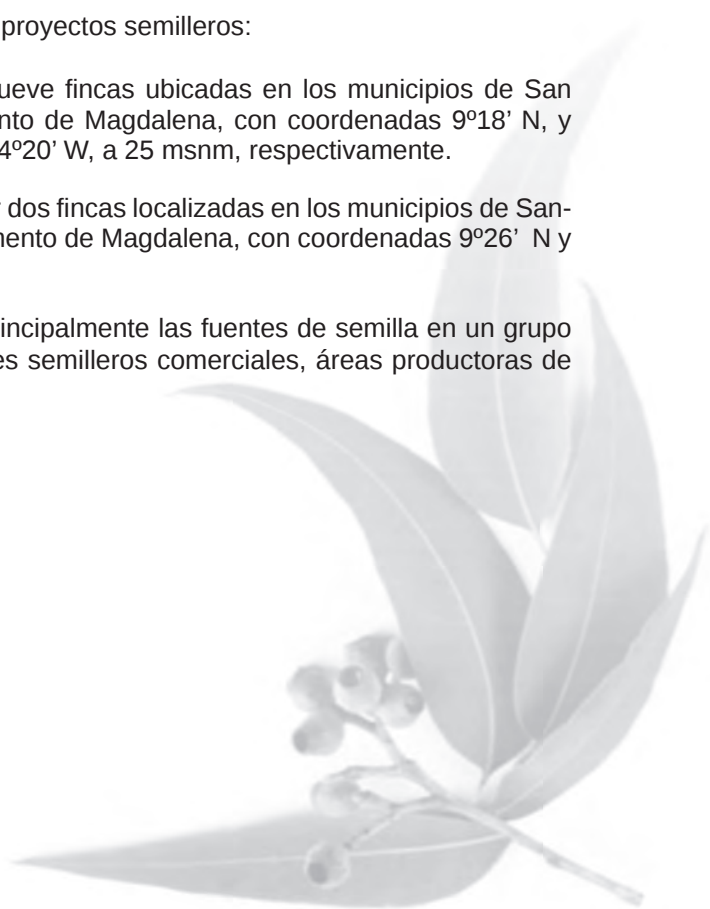




Figura N° 3
ÁREAS PRODUCTORAS DE SEMILLA EN SAN SEBASTIÁN
REFORESTADORA RESS

A partir de estas fuentes de semilla se obtiene el material vegetal que utiliza la reforestadora y muchas otras empresas en la región. Las plantas se obtienen de los viveros de RESS localizados en el municipio de San Sebastián, departamento de Magdalena y el vivero de HBD SAS ubicado en el municipio de Baranoa, departamento de Atlántico.

El esquema de producción es a partir de semillas (en un 70% de la producción) y por propagación asexual, mediante el enraizamiento de estacas (en un 30%).

La obtención de material vegetal a partir de semillas se realiza mediante siembra directa en bolsas de polietileno rellenas con material orgánico.

La producción por estacas se obtiene de la cosecha de rebrotes de los distintos jardines clonales establecidos en campo para tal fin. A la fecha RESS cuenta con cinco jardines clonales, al interior de los cuales tiene alrededor de 280 clones silviculturalmente adaptados a las condiciones edáficas y climáticas de la región.



Figura N° 4
PLANTACIONES DE *E. tereticornis*



Figura N° 5
JARDÍN CLONAL LOCALIZADO EN EL PREDIO EL CORTIJO (Izq)
SISTEMAS DE PROPAGACIÓN POR CLONES EN RESS (Der)



Figura N° 6
ÁRBOLES DE *Eucalyptus tereticornis* DENTRO DE UN ÁREA DE
PRODUCCIÓN DE SEMILLA REFORESTADORA RESS

HITOS DEL DESARROLLO TECNOLÓGICO DE *E. tereticornis* y *E. camaldulensis*

Como se mencionó anteriormente, la entrada del eucalipto a la región del Magdalena Bajo y la Costa Atlántica ha sido el resultado de la iniciativa de la Reforestadora RESS. A continuación se relacionan los principales eventos que han incidido en la adaptación y mejora en la productividad de los eucaliptos en la región. Lográndose materiales adaptados para las tierras ubicadas entre 0 y 400 msnm, con suelos con altos contenidos de sales y calcáreos, en texturas livianas (arenas y limos) o pesadas (arcillas); con precipitaciones entre 900 y 1.200 mm/año, condiciones extremas del Bosque Seco Tropical (bs-T), reportando niveles de producción mínima de alrededor de 20 m³/ha/año.

Durante el periodo 1981 – 1990, la reforestadora San Sebastián (RESS) definió su primer programa de trabajo y depuración del recurso genético, para lo cual contó con el acompañamiento de la empresa Brasileira Suzano. Las acciones silviculturales durante este periodo permitieron el abastecimiento de materia prima a la planta de transformación (Laminas del Caribe) al concluir y cambiar las densidades de siembra de 2.222 árboles por hectárea a 300 – 350 árboles finales. En el periodo entre 1991 y 1998, la Reforestadora logra aumentar su área plantada, define un esquema de manejo silvicultural, con raleos a los 6 y los 10 años de edad, e introduce el manejo de ganado vacuno buscando disminuir los costos de control de malezas. De igual forma, desarrolla algunas acciones para conocer y manejar la polinización controlada de eucaliptos. La finalidad del manejo busca obtener además de pulpa, madera estructural.



Figura N° 7
ÁRBOL SELECCIONADO DE *Eucalyptus tereticornis* EMPRESA RESS

Para el periodo 2001 a 2005, la reforestadora integra la asesoría del Brasileiro Mauro Víctor, quien entre otras cosas propone desarrollar el mercado de la propagación clonal y la venta de semillas o plantas. Igualmente define las pautas de la investigación para mejorar la productividad de las plantaciones. En 2005 se integra a este proyecto reforestador la agencia de cooperación del Gobierno americano USAID, que a través del proyecto Colombia Forestal financia la compilación de información de RESS, lo cual contribuyó a construir un nuevo protocolo técnico silvicultural y el inicio del suministro de material vegetal a proyectos en la región, esto implicó un aumento en la capacidad de producción de material clonal del eucalipto.

Para los años 2005 a 2007 toman fuerza los programas silvopastoriles y a raíz de la visita del asesor en Mejoramiento Genético Forestal Dr. Roberto Ipinza, se establece un huerto semillero clonal con el fin de garantizar a futuro el abastecimiento de germoplasma con buena cantidad y calidad. Para el año 2007 USAID y Madeflex firman un convenio para que esta última sea operadora forestal de 3.000 ha, lo que luego en el 2009 se amplía a 5.000 ha, siempre usando material vegetal de RESS. Estas acciones apoyan la ratificación de la calidad genética del material y ayuda a la operatividad de los procesos clonales. Con esto el vivero de RESS pasa de tener una capacidad de 700 mil plantas a una producción de 4 millones de plantas. Para el año 2009 se integra a estas iniciativas el Fondo de Inversión Forestal (entidad privada de inversión) el que, en alianza con Madeflex, inicia un proyecto de 3.000 ha en regiones antes azotadas por la violencia como los Montes de Maria. Se generan así acciones en tierras de semi-ladera, mediante el uso de sistema de cero labranzas.

Para finales del 2009, RESS y Madeflex inician una serie de alianzas con diferentes entidades privadas (Pizano, CONIF, Pumori), estatales (Minagricultura, Universidad Nacional, Universidad Distrital, Federacafe) e internacionales (USAID – MIDAS), para el desarrollo de investigaciones en mejoramiento genético, estimación del crecimiento forestal, medición del CO₂ y otros temas de interés. Finalmente, en los años recientes, se fortalecen los proyectos de reforestación con material clonal y de semilla. Del material usado, 50% es clonal, el 40% de áreas productoras de semilla y el 10% de huerto semillero. Se desarrolla la transferencia tecnológica para el manejo de suelos calcáreos y se registra el vivero de acuerdo a la normatividad vigente.

Todo este cumulo de acciones puede sintetizarse en términos de la mejora genético de manera gráfica, de esta forma se presenta la estructura de trabajo en mejoramiento aplicado para la región. Las Figuras N° 8 y N° 9 describen los principios de selección y mejoramiento aplicados en la empresa RESS.

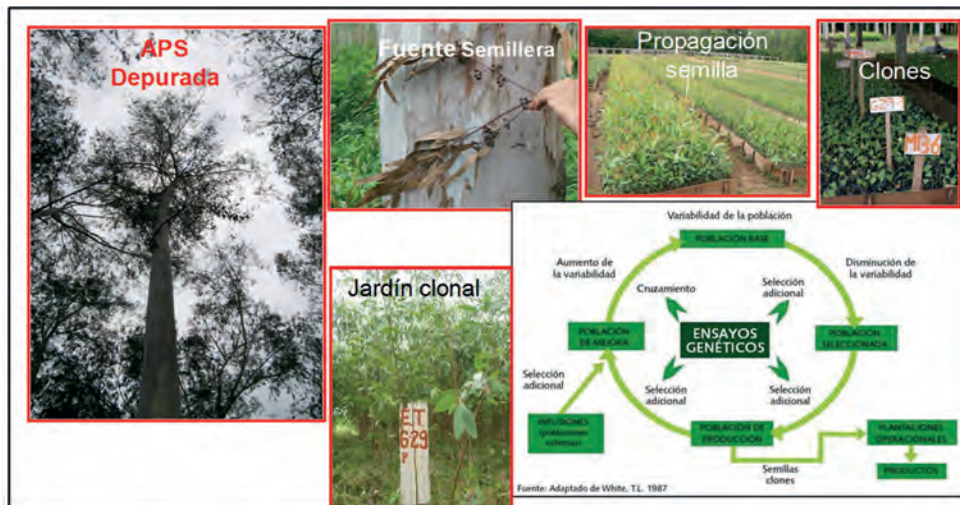


Figura N° 8
ESQUEMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO EMPLEADO DESDE 1984

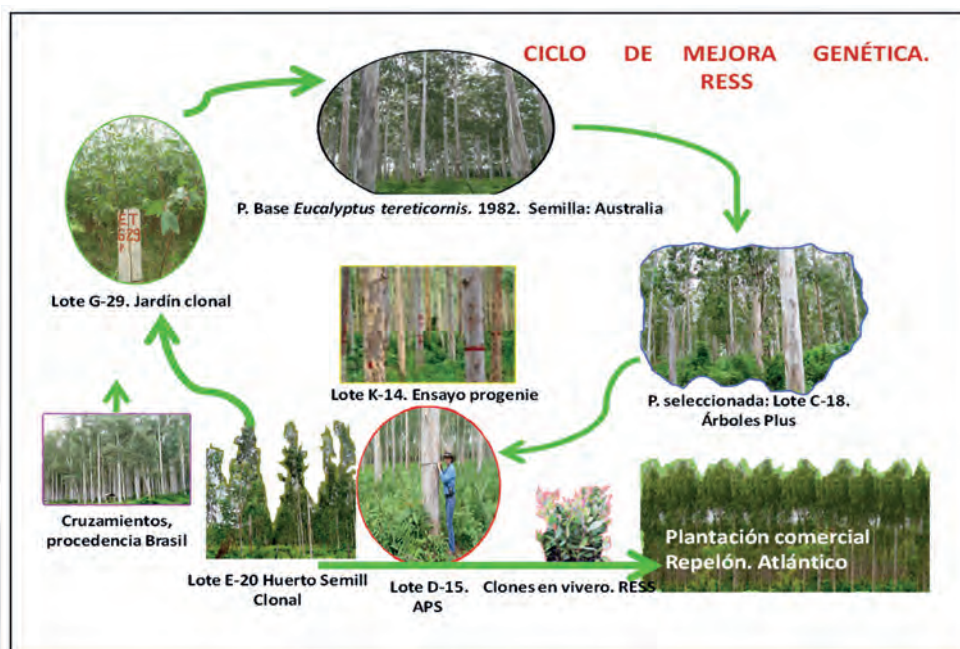


Figura N° 9
ESTRUCTURA DE SELECCIÓN Y MANEJO DE MATERIAL PROPAGATIVO CON EL FIN DE OBTENER PLANTACIONES MEJORADAS DENTRO DE LA ESTRUCTURA OPERATIVA DE LA REFORESTADORA RESS

LA ORINOQUIA, *Eucalyptus pellita*

La Orinoquia colombiana ha sido incluida en los planes de desarrollo del país desde hace muchos años, pero solo hasta hace poco se ha despertado el interés de los inversionistas en volcar los ojos a esta vasta y plana región, que ofrece para los cultivos forestales una gran oportunidad de progreso.

Los motivos para este cambio en la dinámica de la región van desde las oportunidades de empleo y desarrollo de la infraestructura vial que han generado los precios del petróleo y el número de pozos encontrados, hasta la confianza que ha desarrollado la política de seguridad democrática del Estado.

Los focos de plantación han estado en aumento y concentrados en pocas regiones de la inmensa llanura colombiana. Actualmente es posible encontrar áreas plantadas en los municipios de Puerto Carreño y La Primavera en el departamento de Vichada y, Puerto Gaitán y Puerto López en el departamento de Meta.

El inicio de la reforestación en la Orinoquia ha estado centrado en el proceso investigativo desarrollado por Refocosta SAS al interior de su patrimonio forestal ubicado en Villanueva, Casanare. El trabajo de exploración que en su momento adelantó permite concluir que la especie *Eucalyptus pellita* F. Muell puede ser una de las especies con mayor grado de adaptación y potencialidad de crecimiento para la zona.

Resultado de este proceso, hoy en día posee 220 hectáreas operacionales de la especie, equivalente al 10% del patrimonio forestal que Refocosta posee en la región; adicionalmente trabaja también con *Pinus caribaea*.



Figura N° 10
VISTA GENERAL DE PLANTACIONES DE *Eucalyptus pellita* EN LA ORINOQUIA
COLOMBIANA VILLANUEVA, CASANARE

La conclusión sobre utilizar *E. pellita* parte en 1982 cuando se inician acciones encaminadas al mejoramiento genético de familias potenciales del género *Eucalyptus*, evaluación que se basó en la introducción de semillas de diferentes especies y procedencias, como *E. tereticornis*, *E. pellita*, *E. urophylla*, *E. grandis*, *E. alba* y *E. brassiana*.

Los resultados arrojaron que luego de *E. urophylla*, la especie de mayor rendimiento fue *E. pellita*, con una adaptación favorable a las condiciones del municipio, alcanzando para esa fecha, un incremento medio anual mayor a 25 m³/ha/año.

Luego de 19 años de selecciones recurrentes y ajustes en los procesos silviculturales, hoy es posible lograr incrementos de 40 m³/ha/año. Por lo tanto, *E. pellita* es una buena alternativa de recurso genético para las condiciones ambientales y de suelos de la altillanura colombiana, junto con otros eucaliptos que de forma combinada (por hibridación) permitan aprovechar las características de adaptabilidad que la especie puede ofrecer (Nieto y Gasca, 2010).

Para continuar validando este proceso, en 1990 Refocosta SAS importó directamente del Centro Australiano de Semillas de Árboles (ATSC) de CSIRO un nuevo grupo de especies y procedencias de eucalipto, buscando establecer fuentes de materia prima para productos sólidos.

En 1992, en la finca La Aurora, de propiedad de la empresa en Villanueva, Casanare, se estableció un ensayo y se evaluó por un período de nueve años. Las especies utilizadas son las señaladas en el Cuadro N° 1.

Cuadro N° 1
ESPECIES Y PROCEDENCIAS DEL GÉNERO *Eucalyptus* ESTABLECIDAS EN 1992
PROYECTO FORESTAL REFOCOSTA SAS EN VILLANUEVA, CASANARE

Especie/Código Procedencia CSIRO	Procedencia
<i>E. pellita</i> (18199)	Serisa Village (PNG)
<i>E. pellita</i> (17854)	Bupul - Muting (Indonesia)
<i>E. pellita</i> (291)	Queensland (Australia)
<i>E. alba</i> (3111)	Queensland (Australia)
<i>E. tereticornis</i> (13398)	East of Kupiand (P.N. Guinea)
<i>E. brassiana</i> (13415)	S.SK.NE. Banaga (Australia)
<i>E. tereticornis</i> (3252)	Queensland (Australia)
<i>E. tereticornis</i> (2751)	Queensland (Australia)
<i>E. urophylla</i> (V/va)	Villanueva, Casanare (Col)
<i>E. pellita</i> (2746)	Queensland (Australia)
<i>E. grandis</i>	Honduras

En la Figura N° 11 se aprecia el desempeño sobresaliente de *E. pellita* de la procedencia Papúa Nueva Guinea, Sereisa Village, alcanzando un volumen por hectárea de 160 m³ a la edad de 5 años, superior a las demás especies. Las plantaciones operacionales con *E. pellita* se iniciaron a partir de 1995, tomando semillas de los árboles con características fenotípicas sobresalientes que fueron cosechadas al cuarto año de edad y establecidas en

bloques monofamiliares; este esquema permitió establecer plantaciones de progenie durante ocho años. Este ensayo permitió además comparar el rendimiento y la forma de *E. pellita* proveniente de semilla del bosque natural (en la región de procedencia) con otras especies como *E. tereticornis*, para lo cual se encontraron ventajas en características fenotípicas como la forma del fuste de *E. pellita*; de ahí se interpretó que al realizar un proceso de mejoramiento genético, se podría llegar a potencializar aún más propiedades como la rectitud para esta especie (Nieto y Gasca, 2010).

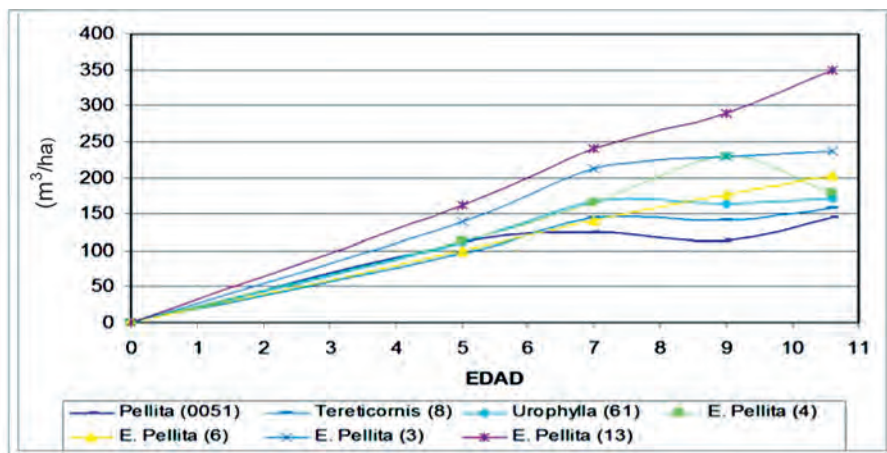


Figura N° 11
RESULTADOS DEL ENSAYO DE ESPECIES Y PROCEDENCIAS.
VOLUMEN POR ESPECIE, AÑO 2003

La ganancia genética obtenida hoy en día por medio de la selección fenotípica es positiva, encontrándose que más del 90% de los individuos manifiestan características deseables como fuste recto, particularidad importante a tener en cuenta cuando se busca en cada árbol diferentes productos como varas, limatones, postes para transmisión eléctrica y madera aserrada.

RESULTADOS PRELIMINARES DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN REALIZADOS POR CONIF EN EUCALIPTOS. AÑOS 2000-2012

En la última década, la Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal (CONIF) ha tenido incidencia en proyectos de investigación con énfasis en el género *Eucalyptus*, en temas como el mejoramiento genético y la evaluación silvicultural y nutricional para plantaciones forestales industriales.

En el Cuadro N° 2 se indica los principales procesos investigativos emprendidos por CONIF, un resumen de estos y los resultados más concluyentes de cada proceso.

Como conclusión final, se presentan los rendimientos promedios obtenidos a través del monitoreo de parcelas permanentes de CONIF en los diferentes puntos de muestreo donde ha sido posible evaluar el crecimiento de eucaliptos. Los datos son de referencia pero muestran los resultados bajo diferentes condiciones de manejo (Cuadro N° 3).

Cuadro N° 2
PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN 2000-2012 CONIF

Proyecto	Resumen	Resultados
Establecimiento y monitoreo de una Red de Parcelas para evaluación del crecimiento de diferentes especies comerciales en diferentes regiones del país.	En alianza con la Corporación para el Desarrollo Forestal de la Costa Norte, Gobernación del Tolima, Corcuencas y Universidad del Tolima, en 2009 se inicia la consolidación de una Red de Parcelas Permanentes (RPP) que permitan el monitoreo al crecimiento de especies forestales utilizadas en reforestación comercial. A finales de 2011 ya se encontraban 277 parcelas instaladas de las especies: <i>Tectona grandis</i>, <i>Gmelina arborea</i>, <i>Eucalyptus tereticornis</i>, <i>Pachira quinata</i>, <i>Eucalyptus camaldulensis</i> y <i>Tabebuia rosea</i> en la zona de la Costa (Magdalena, Atlántico y Cesar). En la zona Centro, conformada por los departamentos de Tolima, Huila y Caldas, se implementaron 244 parcelas de las especies <i>E. grandis</i>, <i>G. arborea</i>, <i>Pinus oocarpa</i>, <i>P. patula</i>, <i>T. grandis</i>. La metodología utilizada en la instalación y medición de las parcelas ha sido la recomendada por López y Barrios (2008). El tamaño de las parcelas es de 500 u 800 m² dependiendo del distanciamiento de plantación, las variables evaluadas son altura total, DAP (diámetro a la altura pecho 1,3 m), posición sociológica, condición y calidad fustal. Los objetivos son consolidar una amplia base de datos para el seguimiento del crecimiento y rendimiento de dichas especies; y desarrollar un software denominado SimFor 1.1, por medio del cual se diseñe el modelo de crecimiento por especie y zona, a partir de indicadores arrojados por las variables.	Para el año 2012 la Red alcanzó cuatro años continuos de datos colectados y un total de 416 parcelas en el territorio nacional. A futuro se espera ampliar la población en estudio y su alcance a otras zonas del país, el ajuste del software se llevará a cabo una vez realizado el aprovechamiento de las parcelas que alcancen la edad de turno. Con base en las mediciones realizadas durante 4 años a 8 parcelas de la especie en los municipios de San Zenón y San Sebastián, en edades 5, 6, 7, 9, 10 y 11 años, se obtuvo un análisis de resultados preliminares para <i>E. camaldulensis</i> en el departamento de Magdalena, Colombia, y los datos reportaron Incremento medio anual-IMA de 13 m³/ha/año, el cual es un registro bajo de acuerdo con la literatura, pero acorde a los promedios de la zona.
Análisis en el diferencial de crecimiento de <i>Eucalyptus tereticornis</i> por material proveniente de semilla o clones para la región del Magdalena bajo	Con el propósito de evaluar la influencia de la fuente de material propagativo sexual (semilla) y asexual (clon) en el crecimiento de <i>E. tereticornis</i>, fueron seleccionadas 62 parcelas en el año 2012 en los departamentos de Magdalena y Atlántico. La edad de las parcelas muestreadas osciló entre los 5 y 11 años.	El resultado del análisis fue un Incremento medio anual – IMA promedio mayor, 13,8 m³/ha/año, en las parcelas con material proveniente de clones, respecto a aquellas provenientes de semilla, 12,1 m³/ha/año.

Proyecto	Resumen	Resultados
Evaluación del crecimiento de <i>Eucalyptus grandis</i> bajo diferentes condiciones climáticas en el departamento de Huila	En el marco de la red de parcelas permanentes para el monitoreo y crecimiento de plantaciones forestales, en alianza con la Empresa Forestal del Huila, se instalaron y midieron durante 3 años 51 parcelas, posteriormente 20 fueron descartadas en la cuarta medición. Los objetivos del estudio fueron evaluar el crecimiento de <i>E. grandis</i> en el departamento del Huila y determinar las mejores condiciones climáticas para el crecimiento de la especie.	El análisis de la información permitió concluir que los grupos climáticos III (1.100 mm de precipitación media anual, 1.200 horas Brillo solar y 21° C de temperatura media anual) y el V (1.100 mm de precipitación media anual, 1.300 horas Brillo solar y 21,5 ° C de temperatura media anual), registraron mayor volumen a la edad de 6 años: 109,4 m³/ha y 91,5 m³/ha, respectivamente. Mientras que los grupos climáticos con menor volumen fueron IV y VI (precipitación mayor a 1.200 mm, 1.100 horas de brillo solar y 22°C de T media) menores a 40 m³/ha a la edad de 6 años.
Establecimiento de una Red de parcelas permanentes en la Región de la Orinoquia Colombiana	En los últimos 10 años la región de la Orinoquia colombiana ha incursionado en los cultivos agroindustriales, como caucho, maíz, caña de azúcar, palma y especies maderables, de tal manera, que surge la necesidad de generar información que respalde estos últimos. En el 2011, CONIF establece las primeras 37 parcelas de <i>A. mangium</i> y para el 2012 se instalan y miden 120 parcelas más, de las especies <i>A. mangium</i> , <i>E. pellita</i> y <i>Pinus caribaea</i> . La metodología es la definida por López y Barrios (2008). El estudio pretende el establecimiento y monitoreo de esta red de parcelas para las tres especies, evaluar su crecimiento y ajustar modelos de volumen y ahusamiento para cada una.	Para <i>E. pellita</i> se establecieron 35 parcelas al año 2012, en los municipios de Puerto Gaitán y Puerto López (Meta), Cumaribo y Puerto Carreño (Vichada), de edades 1 y 3 años. Hay resultados parciales debido a que aun se está ampliando y procesando la base de datos.
Evaluación de tres ensayos de progenie y procedencias de <i>Eucalyptus globulus</i> en el departamento de Boyacá	Con base en las investigaciones desarrolladas en los 80 por el programa de mejoramiento de <i>E. globulus</i> en el predio la Florida, se establecieron en el 2008 tres nuevos ensayos en los municipios de Santa Rosa, Firavitoba y Tuta en el departamento de Boyacá. Los objetivos del estudio fueron rescatar el recurso genético de la especie, comparar el desarrollo de razas locales con razas nativas de Australia y estudiar el control genético y estabilidad de la especie en los tres diferentes sitios. El diseño experimental utilizado fue de 15 bloques completos al azar y <i>single tree plot</i> . El material genético probado en el estudio fue seleccionado del ensayo La Florida, finalmente se seleccionaron 129 individuos, de los cuales se recolectó semilla, 80 familias provenientes de Australia y 40 de Colombia.	De las mediciones realizadas a los tres años de edad, se obtuvo que el ensayo que presentó mejores rendimientos fue Santa Rosa, con un promedio de altura de 11,2 m, 9,7 cm de DAP y un IMA de 12 m³/ha/año. En todos los ensayos se observó que el efecto de la raza en el crecimiento no es significativo a esa edad, no obstante las mejores razas (con mejores registros) fueron aquellas provenientes del Occidente de Tasmania y las islas Flinders. Para el 4° año, las diferencias entre sitios de ensayo fueron más marcadas, el volumen en Santa Rosa es mayor que en Tuta y muy superior a Firavitoba; de igual forma la procedencia-progenie occidente de Tasmania resulto ser la más productiva.

Proyecto	Resumen	Resultados
Crecimiento de 34 diferentes clones de <i>Eucalyptus pellita</i> en Villa Nueva Casanare.	En el marco del mejoramiento genético de <i>E. pellita</i> en la Orinoquia colombiana, se estableció en predios de la empresa Refocosta SAS (Villanueva, Casanare), un ensayo de 38 clones procedentes de árboles seleccionados de la especie. El objetivo principal de la investigación es evaluar el comportamiento de los diferentes clones de <i>E. pellita</i> seleccionados a partir de árboles superiores de plantaciones operativas de Refocosta. El diseño experimental adoptado en el ensayo es de bloques al azar de diferentes tamaños. Se realizaron 3 mediciones de DAP y altura, y una cuarta medición del DAP en 2012.	Los mejores clones 50-12 y 50-26 alcanzaron ganancias hasta del 40% respecto al promedio general del ensayo, el promedio de IMA para todo el ensayo fue de 40 m ³ /ha/año. Los clones 50-12 y 50-26 también sobresalieron por presentar mayores valores de volumen estimado por árbol.
Comparación del crecimiento de cinco clones de <i>Eucalyptus tereticornis</i> promisorios de la Región del Magdalena Seco en tres regiones de la Orinoquia colombiana	Debido al uso exclusivo de <i>E. pellita</i> en proyectos de reforestación en la Orinoquia colombiana, en el 2010 se innovó con tres ensayos que buscan evaluar el crecimiento y adaptación de <i>E. tereticornis</i> , con material proveniente de la empresa RESS (Reforestadora San Sebastián) seleccionado operativamente como de calidad superior. Los ensayos han sido establecidos en Villanueva (Casanare), Puerto Gaitán (Meta) y Puerto Carreño (Vichada) adicionalmente se busca analizar la incidencia del manejo nutricional en los ensayos de Puerto Carreño y Villanueva. Se realizaron 2 mediciones de los ensayos en 2011 y 2012.	Los resultados indican que el IMA a los 1,9 años para el ensayo de Puerto Carreño fue de 9,87 m ³ /ha/año, para Villanueva a los 1,8 años de 8,64 m ³ /ha/año y Puerto Gaitán a la misma edad de 4,91 m ³ /ha/año. Este último con bajos rendimientos debido posiblemente a deficiencias en el programa de fertilización con escasez de algunos elementos mayores como el Fósforo. En cuanto a los análisis foliares se hallaron contenidos medios de N, Mg, Cu y Zn; bajos de P, K, Fe y Mn; y altos de Ca y B, calificados de acuerdo con la literatura para la especie.
Evaluación nutricional y de enmiendas en el crecimiento de <i>E. pellita</i> luego de la aplicación de enmiendas en suelos de Llanos orientales	La región de la Orinoquia caracterizada por suelos de órdenes Ultisol y Oxisol, de baja fertilidad natural, altos contenidos de Al, Mn, ácidos a fuertemente ácidos, pero con propiedades favorables como buena profundidad efectiva y topografía plana, requieren prácticas de enmiendas y fertilización para mejorar la productividad de las plantaciones. Es así, que se establece un ensayo para evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas sobre los suelos de Villanueva, Casanare. El diseño experimental constó de seis tratamientos y un testigo, completos al azar, con tres repeticiones (324 árboles cada repetición), para un área total del ensayo de 5,1 ha. Los tratamientos consistieron en diferentes formulaciones de enmiendas compuestas por Ca, Mg, P, S y Si.	A los 22 meses de edad, fue medido el ensayo, encontrando que el tratamiento 6 con concentraciones más elevadas en Ca, Mg y P, presentó el mejor crecimiento con un DAP promedio de 7,64 cm y 8,63 m de altura, representando una ganancia del 40% en ambas variables respecto al testigo T0. Los resultados superaron las expectativas, debido a que el T6 alcanzó registros mayores a los reportados en promedio.

(Fuente: Adaptado de CONIF, 2013)

Cuadro N° 3
RESULTADOS PARCIALES DEL PROYECTO DE RED DE PARCELAS PERMANENTES DE MONITOREO DE
CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE PLANTACIONES FORESTALES COMERCIALES
CONVENIO CONIF-MADR 2012

ESPECIE / MUNICIPIO	PROMEDIO DE DIÁMETRO MEDIO (cm)	PROMEDIO DE ÁREA BASAL (m ² /ha)	PROMEDIO DE ALTURA DOMINANTE (m)	PROMEDIO DE INCREMENTO MEDIO ANUAL (m ³ /ha/año)
ZONA CENTRO. DEPARTAMENTOS DE ATLÁNTICO Y MAGDALENA				
<i>E. camaldulensis</i>	12,9	13,4	20,9	11,9
San Sebastián	13,2	14,1	21,4	11,9
San Zenón	10,8	8,7	17,9	11,6
<i>E. tereticornis</i>	13,1	12,9	20,6	12,7
Baranoa	10,8	8,4	19,0	12,5
El Piñón	16,5	11,7	22,7	9,4
Galapa	12,2	10,9	20,3	13,2
Polo Nuevo	12,0	11,9	19,2	16,2
Repelón	11,0	11,3	18,9	14,0
Sabanalarga	9,8	7,2	18,0	10,5
San Ángel	11,6	6,2	18,4	5,9
SanSebastián	13,6	14,8	21,1	13,0
San Zenón	12,7	13,1	20,5	14,2
Zapayan	16,7	15,6	23,4	11,0
ZONA CENTRO. DEPARTAMENTO HUILA				
<i>E. grandis</i>	13,4	12,3	14,3	9,4
Acevedo	14,8	18,4	15,8	14,3
Garzón	10,1	7,7	12,8	4,4
Pitalito	16,3	15,6	16,3	12,7
Tarqui	11,5	9,0	12,4	6,6
Timaria	15,0	12,5	16,0	9,6

(Fuente: CONIF, 2012)

REFERENCIAS

Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal-CONIF, 2012. (Documento inédito) Resultados preliminares Red de Parcelas permanentes para el Monitoreo del Crecimiento y Rendimiento de plantaciones forestales Comerciales Convenio CONIF®-MADR.

Corporación Nacional de Investigación y Fomento Forestal-CONIF, 2013. (Documento inédito). Resultados preliminares de investigación en Plantaciones Forestales. Resumen 2000-2012. Bogotá, Colombia. 140 p.

Nieto, V. M y Gasca, G., 2010. Experiencias y avances en el manejo de *Eucalyptus pellita* F. Muell en la Orinoquia colombiana. CONIF, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. 98 P.

Obregón, C. y Restrepo, N., 2009. El eucalipto, una opción de alta rentabilidad. Edición 53 Revista El Mueble y la Madera. Septiembre – Noviembre 2009.

25. PROGRAMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE *Eucalyptus nitens* DE SPT - SEED PRODUCTION TECHNOLOGIES – CHILE

Rebeca Sanhueza¹

INTRODUCCIÓN

Con más de 200.000 ha plantadas en Chile, *Eucalyptus nitens* es una especie ampliamente cultivada en los ambientes templados del país (INFOR 2010, INFOR 2012). Internacionalmente, se la reconoce como una especie de alta calidad pulpable y excelente proyección para productos sólidos, madera laminada y tableros.

Seed Production Technologies (SPT) comenzó su programa de mejoramiento genético a partir de material selecto con pedigree de generaciones avanzadas en el año 2009 y posee familias mejoradas de 1^{ra} y 2^{da} generación producida por polinización abierta y controlada. Estas poblaciones se han evaluado tanto bajo criterios pulpables como aserrables.

Debido a que la propagación clonal de *E. nitens* por medio de estacas no es el método de propagación más eficiente en términos económicos, ni el mejor en términos de productividad, SPT ha establecido 2 huertos semilleros clonales y 2 huertos semilleros de semillas en *joint-ventures*, para usos finales pulpables y aserrables, más 2 áreas productoras de semillas y 7 ensayos de progenies que apoyarán las decisiones de selección.

Las tecnologías de floración acelerada de SPT permitirán no solo avanzar más rápidamente en generaciones de mejoramiento, sino también en la producción estable y eficiente de semilla mejorada para su comercialización.

MEJORAMIENTO GENÉTICO

Eucalyptus nitens H. Deane & Maiden es una especie de muy rápido crecimiento, que existe naturalmente en las regiones altas del Sudeste Australiano, en los estados de Victoria (VIC) y Nueva Gales del Sur (NSW) (Dutkowski *et al.*, 2001; Pederick, 1979; Chippendale, 1988; Boland *et al.*, 1992).

Debido a la sustancial variación genética entre poblaciones que componen el complejo, muchos estudios se han llevado a cabo con el fin de entender las singulares variaciones morfológicas y las sustanciales diferencias entre rasgos de interés comercial que presentan las diferentes procedencias.

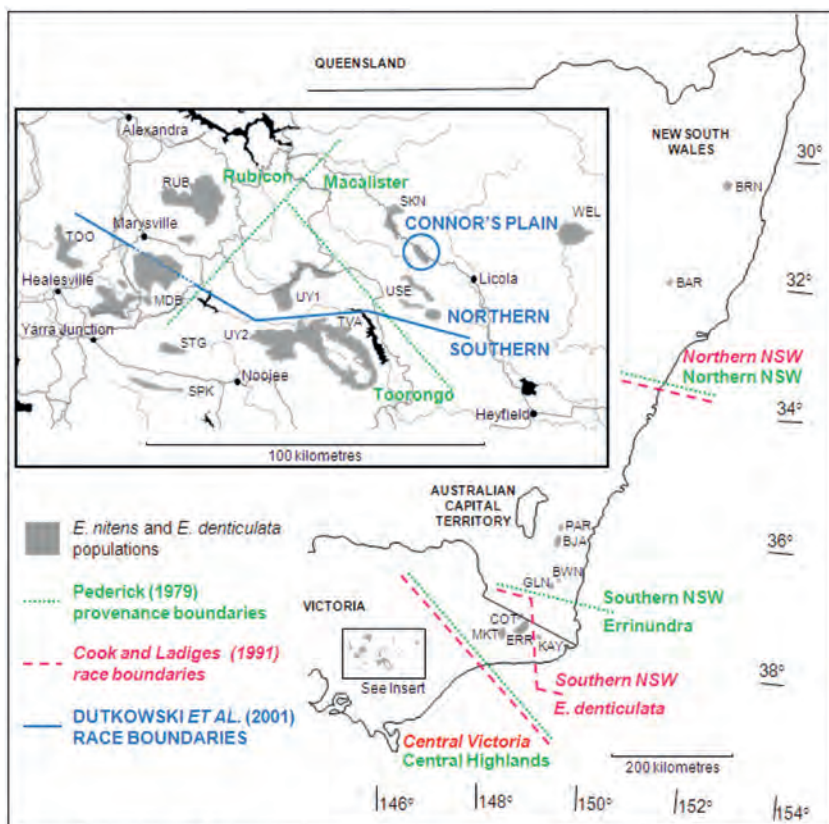
La especie tiene una distribución natural que se extiende desde los 38°S en Victoria central hasta los 30°S en el norte de NSW (Figura N° 1). El rango altitudinal va desde los 670 a los 1.280 msnm en Victoria y hasta los 1.600 msnm en NSW, cerca de Ebor y Barrington Tops (Dutkowski *et al.*, 2001).

El conocimiento de la región geográfica o procedencia del material genético de *E. nitens*

¹ Ingeniero Forestal MSc. Seed Production Technologies, SPT Forestal Chile. rsh@sptchile.com

es fundamental en la comprensión de sus propiedades particulares y de su potencial productivo en el ambiente local (Eldridge *et al.*, 1993).

Así, a partir de estudios pioneros en Australia (Pederick, 1979) como también en Chile (Ipinza *et al.*, 1998) las procedencias de Victoria Central demostraron mejores tasas de crecimiento que las poblaciones de otras regiones dentro del complejo (Dutkowski *et al.*, 2001). Éstas referidas principalmente a las procedencias Toorongo Plateau, Rubicon y Macalister.



(Fuente: Pederick, 1979; Cook and Ladiges, 1991; Dutkowski *et al.*, 2001; Griffin, 2012).

Figura N° 1
DISTRIBUCIÓN NATURAL DE *E. nitens*

Desafortunadamente y a pesar de la información aportada por INFOR, muchas de las primeras introducciones de semilla de *E. nitens* en Chile a finales de los años 80 correspondieron a procedencias de inferior desempeño para crecimiento; Tallaganda, Anembo, Brown Mountain, en general correspondientes a Nueva Gales del Sur, más algunas introducciones de inferior crecimiento de la zona de Victoria, correspondientes a la procedencia Errinundra, que más tarde se reclasificó como *Eucalyptus denticulata* (Cook y Ladiges, 1991).

En consideración de lo anterior, la población de mejoramiento de *E. nitens* de SPT está compuesta por una base genética principalmente enfocada en las procedencias de Victoria Central. Sin embargo, para maximizar heterosis, se han realizado selecciones de las mejores familias de las procedencias de NSW a fin de combinar rasgos de interés presentes en

procedencias diferentes. Por ejemplo, NSW presenta mayor densidad básica que VIC (Hamilton and Potts, 2008).

OBJETIVOS DE MEJORAMIENTO

Los objetivos de mejoramiento de la población de *E. nitens* de SPT están principalmente enfocados hacia maximizar crecimiento en volumen, estando otros rasgos supeditados al desempeño prioritario en crecimiento (Cuadro N° 1).

Cuadro N° 1
VALORES DE PRODUCTIVIDAD DE *E. nitens* A EDAD DE COSECHA (14 AÑOS)

Volumen Total (m³/ha)	IMA (m³/ha/año)	Densidad Básica (Kg/m³)	Rend. Pulpable (%)	Consumo Específico (m³/ADT)	Productividad Celulosa (ADT/ha/año)
630	45	480	54-54.5	3.6-3.7	12-13

(Fuente: Rodríguez, 2011).

Las poblaciones de mejoramiento han sido evaluadas según volumen y densidad básica, y adicionalmente colapso y contracción.

Para *E. nitens* existe una correlación negativa entre volumen y densidad básica, por lo cual ganancias sustanciales en densidad básica se logran en desmedro del crecimiento. Sin embargo, esto solamente impacta a empresas integradas verticalmente. El objetivo de SPT es proveer semillas de alta calidad para productores y pequeñas y medianas empresas, tanto de pulpa como de madera sólida. En consecuencia, su objetivo es mantener densidad básica a una tasa constante, maximizando la tasa de crecimiento, forma, adaptabilidad y uniformidad de las plantaciones comerciales.

Esto también se sustenta en el aumento de la densidad básica con la edad (5-7 kg/ha/año) para *E. nitens*, en la preponderancia de las variables volumétricas manteniendo cierto nivel de densidad básica (Lasserre, 2011) y por el bajo CV aditivo (%) de la Densidad Básica (Hamilton and Potts, 2008).

POBLACIONES DE MEJORAMIENTO

La población de mejoramiento de SPT está basada en familias selectas de Victoria Central (mejor procedencia para Chile) mejoradas en 1 ó 2 generaciones de evaluación y selección en huertos semilleros con selecciones australianas y chilenas.

Población Kinglake

Los primeros ensayos de progenie de *E. nitens* fueron establecidos en Australia por Leon Pederick entre 1968 y 1978 (Forest Commission, Victoria; cit. por Hamilton *et al.*, 2008). A partir de estos se seleccionó y estableció huertos semilleros y clonales en varios sitios, siendo Kinglake uno de ellos. El huerto clonal Kinglake se plantó entre 1994 y 1995 por A. E. O'Connor Pty, con 46 clones selectos de 27 familias procedentes de cuatro ensayos de progenie (1975-1978) de Forests Commission of Victoria. Las familias correspondían a las procedencias de Victoria Central; Macalister, Rubicon y Toorongo.

Los mejores individuos de las mejores familias fueron seleccionados en base al análisis de los cuatro ensayos de progenie, siendo verificadas fenotípicamente las selecciones finales.

El Centro de Tecnología Forestal (Australia) ha estimado la ganancia genética en volumen, de las plantaciones establecidas a partir de este material, en un 22% respecto de testigos comerciales naturales (Data Bail, I., 1997, entregado por Lavery, M. com. personal). Esta ganancia genética es la combinación de 10% debido a *outcrossing* entre clones no emparentados y 12% debido a clones con desempeño superior.

La base de comparación es sobre un rodal de 300 m³/ha a edad de cosecha, utilizando metodología aprobada por STBA (Southern Tree Breeding Association).



Figura N° 2
FAMILIAS DE *E. nitens* PROCEDENTES DE HSC AUSTRALIA KINGLAKE. 2 AÑOS.
HUERTO SEMILLERO KINGLAKE EN CURICÓ, CHILE.

A partir de esta colección, 46 familias de polinización abierta de huerto clonal se establecieron en Chile en los años 2010 y 2012 en ensayos de progenie y huertos semilleros. Los huertos semilleros se han establecido bajo régimen de manejo intensivo para producción de semillas (Figura N° 2).

Población Derford

Derford Nitens es una empresa australiana que comercializa semilla de su huerto semillero Bream Creek. El huerto original se estableció en 1991 a partir de 24 familias de polinización abierta de primera generación procedentes de Toorongo, Rubicon y Macalister (Hamilton *et al.*, 2008). Este huerto fue depurado según DAP y densidad básica, estimándose valores de mejoramiento para un índice de calidad de pulpa.

En 1999 se estableció los ensayos de progenie con familias de polinización abierta y controlada, más testigos naturales Tallaganda, Toorongo y Rubicon (Colección CSIRO²). Los ensayos se establecieron en dos sitios contrastantes de Tasmania: Georges Plain, en el norte de la isla y Magazine Road, en el sur. El objetivo de estos ensayos fue verificar las ganancias

² Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia

genéticas estimadas a partir de los ensayos de 1^{ra} generación y permitir una depuración genética adicional, considerando no los valores de mejoramiento, sino esta vez los valores de implementación operativa de la plantación (*deployment values*). La ventaja de los valores de implementación es que son mucho más directos, robustos e insesgados en la predicción de las ganancias de una plantación establecida con semilla de huertos semilleros, versus los valores de mejora. Los valores de implementación permiten maximizar las ganancias en las plantaciones comerciales seleccionando “hacia atrás” aquellas madres en el huerto que producen semilla (progenie) de crecimiento superior.

Estos ensayos de 1999 fueron evaluados según volumen, densidad básica, colapso y contracción, estimándose una ganancia en volumen promedio del huerto del 19% a los 6 años de edad sobre los testigos de semilla nativa (Greaves, 2005) (Figura N° 3). Mayores ganancias pueden obtenerse mediante la selección de familias dentro del huerto.



Figura N° 3
FAMILIA DE DERFORD *E. nitens* CON ALTO RANKING GENÉTICO EN AUSTRALIA
(6 AÑOS, PARCELAS LINEALES DE 5 PLANTAS/FAMILIA).

A partir de 1999, se continuó estableciendo ensayos de progenie en varios sitios y países:

Cuadro N°2
ENSAYOS DE PROGENIES DE HUERTOS SEMILLEROS

Ubicación Ensayo	Progenies (N°)	País	Establecimiento (Año)
Magazine Road SE Tasmania	2.900	Australia	1999
Camden Hills N Tasmania	1.900	Australia	1999
Celery Top Tasmania	800	Australia	2000
Saltmarsh Tasmania	2.500	Australia	2000
Chile	2.000	Chile	2004
España	1.000	España	2005
Davey, Otways Victoria	500	Australia	2008
Willmont NW Tasmania	500	Australia	2008
Windy Ridge N Tasmania	500	Australia	2008
Bulnes	1.080	Chile	2012
Osorno	1.080	Chile	2012
Curicó	720	Chile	2012
Yungay	600	Chile	2012
Lanco	1.008	Chile	2012
Total	17.088		

Con la información de éstos ensayos se estimarán correlaciones genéticas y parámetros de ganancia, y principalmente se estimarán valores de implementación para plantaciones operacionales en varios países/ambientes.

Población Chile

A estas poblaciones Australianas, se sumó una colección de familias selectas en Chile originarias de Victoria Central, con selecciones Toorongo, Macalister y Rubicon; a partir de un nuevo análisis genéticos de SPT y aportadas por el Instituto Forestal de Chile. Estas se establecieron en 2 huertos semilleros clonales en 2011 y 2012. Actualmente se encuentran bajo manejo intensivo. El promedio de ganancia genética estimada para estos ensayos es de 25% en volumen (Análisis interno SPT).

A los ensayos de progenie de estas colecciones se agregaron testigos locales de semilla comercial, más semilla adquirida por SPT a partir de colecciones CSIRO y otras. La base total de material genético de *E.nitens* de SPT es de 180 familias de polinización abierta.

Una colección adicional de procedencia NSW (Ebor) se estableció en Chile en el 2012, a fin de comparar desempeño respecto a otras fuentes y con el objetivo de seleccionar individuos superiores en procedencias de NSW.

PARÁMETROS GENÉTICOS

Hamilton y Potts realizaron entre los años 2001 y 2008 una exhaustiva recopilación de parámetros genéticos para la especie en diversos ambientes. Así mismo, Velilla *et al.* (2007) publicaron resultados de 47 ensayos de progenie de *E. nitens* en varios ambiente locales, tanto en sitios costeros de la región del Bio Bio, Chile, como sitios de altura en la precordillera de la región y en el valle central de las Regiones del Bio Bio y La Araucanía (Sur de Chile).

En los Cuadros N° 3, N° 4 y N° 5 se resume los principales parámetros genéticos para la especie (Hamilton y Potts, 2008; Velilla *et al.*, 2007).

Las heredabilidades promedio para crecimiento fueron en general menores que las heredabilidades para densidad básica o Pilodyn (e.g. $h^2 = 0.26$ versus $h^2 = 0.51$ en Hamilton y Potts; $h^2 = 0.16$ versus $h^2 = 0.26$ en Velilla *et al.*, 2007); sin embargo el coeficiente de variación aditivo fue mayor para densidad básica versus crecimiento, indicando que aún cuando las variables de madera están bajo fuerte control genético aditivo (heredabilidad), la respuesta a la selección se encuentra supeditada a la menor variación genética aditiva del rasgo (Cuadros N° 3 y N° 4).

Las correlaciones genéticas entre rasgos son consistentes en sugerir una asociación desfavorable entre diámetro y densidad básica (-0,27 en Hamilton y Potts, 2008) o bien entre volumen y Pilodyn (0.31 en Velilla *et al.*, 2007). Como se mencionó anteriormente, esto tiene distintas implicancias para empresas verticalmente integradas y para productores silvícolas, quienes deben ponderar apropiadamente cuál es la variable que causa mayor impacto en los retornos esperados de cada negocio (Cuadro N°5).

Cuadro N° 3
HEREDABILIDAD POR SITIO Y COEFICIENTE DE VARIACIÓN
DE LA VARIANZA GENÉTICA ADITIVA (CVa) PARA *E. nitens*
(Progenies Polinización abierta, Coef. de parentesco 0,4)

Rasgo	h ²	CVa (%)
Crecimiento	0,30	12,4
Prop. Madera	0,45	4,7
Diámetro	0,26	
Densidad Básica	0,51	
Pilodyn	0,35	
Rend. Pulpable	0,50	
Cont. Celulosa	0,67	
Tamaño ramas	0,12	
Rectitud	0,28	

(Fuente: Hamilton y Potts, 2008)

Cuadro N° 4
HEREDABILIDAD ENTRE SITIOS PARA *E. nitens*
(Progenies Polinización abierta, Coef. de parentesco 0,4)

Rasgo	Estimaciones	Media	Min	Max
Diámetro	106	0,70	-0,15	1,14
Densidad Básica	5	0,77	0,67	0,92
Pilodyn	4	0,91	0,79	0,99
Cont. Celulosa	4	0,85	0,77	0,91
Tamaño ramas	2	0,72	0,63	0,8
Rectitud	3	0,78	0,62	0,93

(Fuente: Hamilton y Potts, 2008)

Para el caso de Chile, son especialmente interesantes las estimaciones de correlación genética del Cuadro N° 5 (Velilla *et al.*, 2007).

Cuadro N° 5
CORRELACIONES GENÉTICAS ENTRE SITIOS PARA *E. nitens*
(Progenies Polinización abierta, Coef. de parentesco 0,4)

Correlación Genética Tipo B por Rasgo de Interés		
Grupo de sitios	Volumen	Pilodyn
Valle - Costa	0,83	0,81
Valle - Trumao	0,84	0,87
Valle- Valle	0,71	0,85
Trumao - Costa	0,86	0,87
Trumao - Trumao	0,9	0,98
Costa - Valle - Trumao	0,86	0,89

Heredabilidad por Rasgo	Volumen	Pilodyn
Costa - Valle - Trumao	0,16	0,26

Correlación Genética entre Rasgos (rA) Volumen-Pilodyn		
Costa - Valle - Trumao	0,31	

(Fuente: Velilla *et al.*, 2007)

En este estudio se compararon 47 ensayos entre 4 y 14 años, en 3 macrozonas con 5 tipos de suelo, diferente régimen pluviométrico, climático y altitudinal dentro de las regiones del Bio Bio y La Araucanía (aproximadamente entre los 37° y 38° latitud sur). Las correlaciones entre sitios, tanto para volumen como para Pilodyn, fueron altas ($r_B=0.86$ para Volumen y $r_B=0.89$ para Pilodyn), información que refuerza la alta correlación genética entre ambientes para la especie estudiada (Cuadro N° 5).

En base a toda esta información recopilada, se puede tener un alto grado de confianza entre los *rankings* generados en Australia y aquellos obtenidos en Chile, pese a que no existen aún datos directos entre países.

No obstante, se sabe que existe interacción genotipo ambiente en las procedencias de NSW y VIC cuando se establecen bajo tipos climáticos diferentes. Esto es, las procedencias de Victoria Central se comportan mejor en ambientes templados mediterráneos, con régimen pluviométrico de lluvias en invierno y veranos secos, semejantes a los que ocurren en su ambiente local. En contraste, las procedencias de NSW, que se distribuyen en forma natural en tipos climáticos sub-tropicales de veranos cálidos y lluviosos, se desarrollan mejor que las procedencias de Victoria en zonas sub-tropicales como Sudáfrica, con lluvias de verano. Esto puede también relacionarse con la diferencia en la resistencia a *Mycosphaerella* que presentan las distintas poblaciones de *E. nitens* (Purnell and Lundquist, 1986; Eldridge *et al.*, 1993) y que se manifiesta en los climas de veranos muy cálidos y húmedos, con especial severidad en las procedencias de Victoria.

BIOLOGÍA REPRODUCTIVA Y POLINIZACIÓN CONTROLADA

La especie *Eucalyptus nitens* es predominantemente polinizada por insectos (Hingston *et al.*, 2004). Presenta el sistema mixto típico del género *Eucalyptus* con protandria en sus flores hermafroditas que evita al menos en cierto grado la autopolinización (Eldridge *et al.*, 1993).

El polen se dispersa normalmente sobre 100 m, aunque puede llegar hasta 1,6 km de distancia, dependiendo de las fuentes de contaminación (Barbour *et al.*, 2005).

A pesar de toda la investigación en biología reproductiva y cruzamientos controlados en la especie (Tibbits, 1989), casi el 100% de los propágulos plantados de *E. nitens* proceden de semilla de polinización abierta (Griffin, 2012).

Según Tibbits (1989), *E. nitens* produce en promedio 7,9 semillas por cápsula de polinización controlada, bajo condiciones de floración en verano en Australia, con una supervivencia promedio de cápsulas de 45%. Este mismo estudio señala un promedio de 3,8 semillas por cápsula originadas de polinización abierta.

Las técnicas de polinización controlada (OSP) utilizadas en *Eucalyptus globulus* (Harbard *et al.*, 1999), no son aún económicamente viables en *E. nitens*, por tanto, este hecho unido al bajo enraizamiento promedio de la especie, que imposibilita la silvicultura clonal y la familiar, obliga a un adecuado manejo en huertos semilleros y, por el momento, a producir principalmente semilla por polinización abierta.

Consecuentemente, el manejo de huertos semilleros de *E. nitens* es una actividad crucial en el mejoramiento genético de la especie. En este sentido, se ha avanzado mucho en el manejo

de la fenología floral de la especie, tanto por factores genéticos como ambientales, así como en la manipulación de parámetros fisiológicos de floración (Palma, 2012).

ESTABLECIMIENTO EN PLANTACIONES

Varios estudios citados por Griffin (2011; 2012) sugieren que la mejor alternativa para propagar *E. nitens* es a través de semilla, no solo debido a rasgos de propagación, sino también debido a rasgos de producción. El objetivo de SPT es producir semilla de alta calidad en forma estable y permanente, y trabajar coordinadamente con productores y silvicultores a fin de efectuar evaluaciones conjuntas de material genético para selección. De esta manera, los silvicultores tendrán acceso a información genética generada en el propio patrimonio de sus plantaciones y podrán elegir el material mejor adaptado a sus condiciones particulares. Esta semilla estará disponible para sus plantaciones productivas y la información generada permitirá avanzar en el mejoramiento continuo de las poblaciones de mejoramiento.

Estudios a partir de ensayos de progenie de *E. nitens* en Australia, realizados por Seed Energy, ponen de manifiesto la baja correlación entre los valores de mejoramiento estimados a partir de ensayos de progenie que luego son extrapolados a huertos semilleros (Griffin, 2012). Seed Energy encontró valores de correlación genética $r^2=0.04$ ($r=0.21$) al comparar estimaciones de valores de mejoramiento de selecciones hacia adelante versus selecciones hacia atrás. SPT tiene como objetivo estimar sus valores de mejoramiento a partir de los huertos semilleros productivos estableciendo progenies en patrimonio de terceros, pero no tan solo en este aspecto, sino también manejando otros aspectos fundamentales, como la época de floración. En Chile, es común que los árboles de la especie florezcan durante un período prolongado en el año, exhibiendo floración en invierno, cuando hay muy pocos insectos polinizadores en las flores. Esto puede resultar en autopolinización de los individuos, lo cual conlleva efectos indeseables en el crecimiento de las plantas. SPT maneja sus huertos productivos con el objetivo de maximizar la producción de genotipos selectos, estimulando una verdadera panmixia en los huertos semilleros, de manera tal que cada familia se produzca lo más cercanamente posible a una mezcla completa de los genotipos en el huerto.

Dentro de cinco años, las selecciones de SPT provendrán de las mejores familias a establecer en un nuevo grupo de huertos semilleros clonales, lo cual generará otro salto fundamental en la ganancia genética.

HUERTOS INTENSIVOS Y POBLACIÓN DE PRODUCCIÓN

Los avances en la composición y características geográficas de las procedencias naturales de *E. nitens* han sido incorporados en las poblaciones de mejoramiento de SPT. Las tecnologías de manejo de huertos de esta empresa permiten formación de yemas florales en *E. nitens* a los 2 años de edad, tanto en injertos como en plantas de semillas (Sanhueza, 2012). Estas técnicas de manejo fisiológico se desarrollan y mejoran aplicando conceptos innovadores en los huertos productivos de SPT en Chile.

Adicionalmente, SPT posee huertos en asociación con las poblaciones de mejoramiento ya descritas para los huertos semilleros Bream Creek y Kinglake.

Bream Creek (Huerto Semillero de Semillas)

Es un huerto semillero de semillas, de segunda generación, establecido con 24 familias colectadas de un huerto semillero de semillas de primera generación. El huerto Bream Creek fue plantado en 1990, con un diseño de replicas que incluye solo selecciones de Victoria Central y que se evaluó a los 5 años según volumen y densidad.

Se utilizó posteriormente un índice de selección genética considerando ambos rasgos, y se depuró el 50% de los árboles en 1997. Desde el año 2002 se ha colectado semilla sobre la base de estos datos, según los siguientes grados: Nivel 3 (promedio del huerto), nivel 4 (mejor 50% de los árboles del huerto) o nivel 5 (mejor 25% del huerto). Adicionalmente, la semilla nivel 5 se clasifica entre pulpable o aserrable, usando objetivos y pesos económicos preparados por Greaves (2005). Las ganancias se expresan en relación al promedio sin mejora de las procedencias de Victoria Central (las procedencias de mejor crecimiento en Chile y Australia), por lo tanto, utiliza una base más exigente que Tallaganda (base que utilizan varios huertos semilleros en Chile). Semilla selecta de estos huertos se utilizó para establecer cinco ensayos de progenie en Chile en el año 2012 y un huerto semillero de semillas con 100 familias provenientes del huerto Bream Creek.

Kinglake (Huerto Semillero Clonal)

Este huerto fue establecido en 1995, con injertos de 68 clones selectos de 27 familias de ensayos de progenie de primera generación, establecidos en 4 sitios con familias de procedencias Rubicon y Toorongo. Se identificaron las familias de crecimiento superior y posteriormente se realizó la selección de los mejores individuos entre ellas. El huerto sufrió daño y mortalidad de individuos, de modo que según el inventario hasta el año 2004, sobrevivían 48 clones, los que proveen el *bulk* de semillas que se ofrece a clientes e interesados.

En el año 2009, este huerto sufrió daño por incendios y gran parte se quemó afectando la disponibilidad de semillas por 2-3 años.

Las ganancias se estiman en relación al promedio de las procedencias de Victoria Central para *E. nitens*, población manejada en su tiempo por STBA (Southern Tree Breeding Association). En el año 2003, estas ganancias se estimaron en 22,3% para Volumen y -0,3 para densidad básica (percentil 19 respecto a la población de *E. nitens* de Victoria Central evaluada: 17 ensayos, 36.000 individuos establecidos en Victoria y Tasmania) (Sasse, 2004).

Semilla selecta de estos huertos se utilizó para establecer dos ensayos de progenie en Chile en los años 2010 y 2012, y dos huertos semilleros de semillas con 49 familias provenientes del huerto Kinglake.

Maitencillo (Huerto Semillero Clonal)

Durante los años 2010 y 2011, 26 individuos selectos por INFOR y SPT de las procedencias de Victoria Central, fueron injertados y establecidos en huertos semilleros clonales en Maitencillo (Región de Valparaíso, Chile). Las ganancias genéticas estimadas para este grupo de clones corresponden a 25% en volumen.

Estos huertos están manejados en forma intensiva utilizando protocolos de manejo fisiológico de SPT (Palma, 2012). El uso de paclobutrazol es una actividad de rutina en manejo de huertos semilleros de *Eucalyptus*, como una forma de estimular floración e incrementar la producción de semillas. El paclobutrazol inhibe la producción de giberelinas resultando en un amplio rango de cambios en la actividad fisiológica de las plantas, que se manifiesta en la reducción en la tasa de crecimiento, elongación de brotes vegetativos y aumento en la aparición de yemas florales (Griffin *et al.*, 1993).

CONCLUSIONES

Con la permanente expansión de las plantaciones de *E. nitens* en Chile, tanto con propósitos pulpables como para productos sólidos, existe una demanda continua para el establecimiento de plantaciones genéticamente mejoradas para usos finales específicos. El programa de genética de SPT pronto avanzará hacia su tercera generación de mejora, y continuará desarrollando y perfeccionando su población elite de producción para abastecer a viveros y plantaciones comerciales que suministrarán madera de alta calidad y productividad para las industrias nacionales y extranjeras de pulpa y aserrío.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece la información aportada por: Rod Griffin, Alejandro Palma y Francisco Hernández (Seed Production Technologies), Martyn Lavery (Arianda Pty. Ltd.) y Peter Gore (Derford Nitens and Seed Energy Pty. Ltd.).

REFERENCIAS

- Barbour, R.C.; Potts, B.M. and Vaillancourt, R.E. 2005. Pollen dispersal from exotic *Eucalypt* plantations. *Conservation Genetics* 6, 253–257.
- Boland, D.J.; Brooker, M.I.H.; Chippendale, G.M.; Hall, N.; Hyland, B.P.M.; Johnston, R.D.; Kleinig, D.A. and Turner, J.D. 1992. *Forest Trees of Australia*. CSIRO Publications, Melbourne, Victoria.
- Cook, I.O. and Ladiges, P.Y. 1991. Morphological variation within *Eucalyptus nitens* S. Lat. and recognition of a new species, *E. denticulata*. *Australian Systematic Botany* 4, 375–390.
- Chippendale, G.M. 1988. *Flora of Australia Volume 19, Myrtaceae - Eucalyptus, Angophora*. Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Dutkowski, G.W.; Potts, B.M.; Williams, D.R.; Kube, P.D. and McArthur, C. 2001. Geographic genetic variation in Central Victorian *Eucalyptus nitens*. In 'Developing the Eucalypt of the Future'. 10–15 September, Valdivia, Chile. p. 39.
- Eldridge, K.G.; Davidson, J.; Harwood, C.E. and van Wyk, G. 1993. *Eucalypt domestication and breeding*. Oxford University Press. pp. 114–122.
- Greaves, B. 2005. Estimated deployment values and expected deployment gains for *Eucalyptus nitens* seed lots from the Derford Nitens Bream Creek seed orchard. A report to Derford Nitens and FEA. November 2005. Informe Interno Derford Nitens. Unpublished.
- Griffin, A.R. 2012. Domestication of Temperate *Eucalyptus*: Past, Present and Future. In *Eucaliptos Mejorados para aumentar la competitividad del sector forestal en América latina*. Pucón, Chile, 22–23 Noviembre 2012.
- Griffin, A.R. 2011. Clonal Forestry – is it always the best deployment option?. In 'Joining silvicultural and genetic strategies to minimize *Eucalyptus* environmental stresses: from research to practice". IUFRO Porto Seguro, Brasil. 14–18 Noviembre 2011.

- Griffin, A.R.; Whiteman, P.; Rudge, T.; Burgess, I.P. and Moncur, M. 1993.** Effect of paclobutrazol on flower-bud production and vegetative growth in two species of *Eucalyptus*. Canadian Journal of Forest Research 23, 640–647.
- Hamilton, M.G. and Potts, B.M. 2008.** *Eucalyptus nitens* genetic parameters. New Zealand Journal of Forestry Science, 38 (1) pp. 102-119.
- Hamilton, H.; Joyce, K.; Williams, D.; Dutkowski, G. and Potts, B. 2008.** Achievements in forest tree improvement in Australia and New Zealand. 9. Genetic improvement of *Eucalyptus nitens* in Australia. Australian Forestry 2008 Vol. 71 No. 2 pp. 82–93
- Harbard, J.L.; Griffin, A.R. and Espejo, J. 1999.** Mass controlled pollination of *Eucalyptus globulus*: a practical reality. Canadian Journal of Forest Research 29, 1457–1463.
- Hingston, A.B.; Mc Quillan, P.B. and Potts, B.M. 2004.** Pollinators in seed orchards of *Eucalyptus nitens* (Myrtaceae). Australian Journal of Botany 52, 209–222.
- INFOR, 2010.** Anuario Forestal 2010. Boletín Estadístico N°126. Santiago, Chile. 134 p. Instituto Forestal, Chile.
- INFOR, 2012.** Mercado Forestal, Boletín N° 49, Junio 2012 .
- Ipíñza, R.; Molina, M. y Gutiérrez, B. 1998.** Análisis genético multivariado y catálogo de valores genéticos de ensayos de progenie y procedencia de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden, en Chile. En: “Actas Primer Congreso Latinoamericano IUFRO: El manejo sustentable de los recursos forestales. Desafíos del siglo XXI.” Valdivia, Chile.
- Lasserre, J.P. 2011.** Celulosa *E. nitens* : Una mirada desde el bosque. En PIT nitens Valdivia. Julio 2011.
- Palma, A. 2012.** Conceitos de fisiologia vegetal aplicadas ao manejo do pomar. En I Workshop de Manejo de Pomares de Polinização Controlada. IPEF. Duratex – Lençóis Paulista (SP) Brasil. 08 e 09 de Agosto de 2012.
- Pederick, L. A. 1979.** Natural variation in Shining Gum (*Eucalyptus nitens*). Australian Forest Research 9: 41-63.
- Purnell, R.C. and Lundquist, J.E. 1986.** Provenance variation of *Eucalyptus nitens* on the Eastern Transvaal Highveld in South Africa. South African Forestry Journal 138, 23–31.
- Rodríguez, J. 2011.** *Eucalyptus* Production in Temperate Regions. IUFRO Conference, 14-18 November 2011. Porto Seguro, Brazil.
- Sanhueza, R. 2012.** Aplicações da manipulação fisiológica do pomar no melhoramento genético. IPEF. Duratex – Lençóis Paulista (SP) Brasil. 08 e 09 de Agosto de 2012.
- Sasse, J. 2004.** Evaluation of the *Eucalyptus nitens* seed orchard at Kinglake. Report No. 2004/2005. March 2004. Prepared for Silvagene Pty. Ltd. (Timbercorp) and Hancock Victorian Plantations Pty. Forest Science Centre. Department of Natural Resources and Environment, Victoria, Australia.
- Tibbits, W.N. 1989.** Controlled pollination studies with Shining Gum (*Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden). Forestry 62, 111–126.
- Velilla, E.L.; Dutkowski, G. and Sanhueza, R. 2007.** Genetic analysis of *Eucalyptus nitens*: Genetic parameters and breeding value predictions In conference on “Eucalypts and diversity: balancing productivity and sustainability”. Durban 22 - 26/10/2007.

Braulio Gutiérrez Caro. Ingeniero Forestal de la Universidad de Chile. Más de 20 años de experiencia como investigador del instituto forestal, donde se ha especializado en la ejecución y dirección de diversos programas de mejoramiento genético en especies forestales nativas y exóticas. Autor de más de 50 publicaciones técnicas y de difusión en el ámbito del mejoramiento genético. Es miembro del Comité Editor de INFOR y de la Revista Ciencia e Investigación Forestal de la institución. Ha sido galardonado con la Distinción Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile y con el Premio a la Excelencia Académica otorgado por el Colegio de Ingeniero Forestales.
Instituto Forestal. Chile.
bgutierr@infor.cl

Nuno Borralho. Consultor Internacional en Mejoramiento Genético Forestal, Genética y Genómica, incluyendo análisis estadísticos (AsReml) y formulación de estrategias de I+D en mejoramiento genético y obtención de germoplasma mejorado, con énfasis en eucaliptos pinos y más recientemente teca y acacias. Es investigador asociado del Centro de Estudos Florestais (CEF), una unidad de investigación de la Universidad Técnica de Lisboa, e investigador asociado y coordinador de Genética Forestal del Instituto de Investigação Científico Tropical (IICP), Portugal. Ha participado en varios proyectos de investigación y mejoramiento genético operacional en Europa, Sudamérica y Australia. Sus áreas de especialización incluyen aspectos económicos y de organización del mejoramiento genético, estrategias de medición, y procedimientos para la estimación de los valores de mejora y parámetros genéticos.
Consultor Internacional. Portugal.
nunoborralho@sapo.pt





www.infor.cl