

RESUMEN

Se discute el concepto de regiones de procedencia y de enfoques complementarios para el ordenamiento genético territorial, con énfasis en la conservación y recuperación de bosques. Se analiza también el concepto de semilla local, de la conveniencia de su utilización y de las situaciones en que no constituye la fuente idónea de material genético para restauración, así como las consideraciones a tener en cuenta para el movimiento de semillas entre regiones de procedencia.

Palabras clave: Regiones de procedencia, Fuentes semilleras, Restauración.

SUMMARY

The concept of provenance regions and complementary approaches to territorial genetic ordering, with emphasis on forest conservation and recovery, are discussed. The "local seed" concept, the convenience of its use and situations in which it is not the ideal source of genetic material for restoration, as well as the considerations to be taken into account for the movement of seeds between provenance regions are discussed too.

Keywords: Provenances regions, seed sources, restoration

INTRODUCCIÓN

Un importante aspecto a considerar en la utilización de semillas de especies forestales nativas es ¿qué tan lejos de su origen puede ser utilizada la semilla proveniente de una determinada fuente semillera? o equivalentemente ¿en qué superficie puede ser utilizada esta semilla sin riesgo de contaminación genética¹⁷ o pérdida de adaptabilidad que repercuta en la supervivencia y productividad de la plantación? A este respecto, la elección de la procedencia de la semilla resulta una etapa crítica, ya que los acervos genéticos seleccionados tendrán un efecto determinante durante todo el ciclo de vida de los árboles implantados y aún en generaciones venideras.

También es importante considerar cuál es el alcance y extensión de uso de la denominada semilla local y tener en consideración, especialmente en iniciativas de restauración de bosques degradados y en un escenario de cambio climático, que, a diferencia de la recomendación general, la semilla local no siempre es el germoplasma más adecuado para una determinada iniciativa de plantación.

En estos contextos se requiere contar con una herramienta que permita identificar con seguridad el origen del material utilizado en la producción de plantas para forestación. Este aspecto es especialmente relevante, por cuanto, aunque se cuente con fuentes semilleras adecuadas, no existen criterios de ordenamiento genético territorial que determinen las áreas de establecimiento de las plantas en función del origen de sus semillas.

En efecto, no existe control del área de utilización de un determinado origen de semillas, el cual suele usarse para establecer plantaciones en áreas muy diferentes a aquellas donde fueron colectadas. Consecuentemente, en este documento se abordan los fundamentos para desarrollar un esquema orientado a ordenar y regular el uso de las semillas en unidades territoriales ecológicamente homogéneas, donde el material de propagación tenga un desempeño y adaptación similar.

Particularmente, se esbozan los fundamentos para efectuar una definición de zonas de procedencias para especies forestales nativas, explicando la necesidad de contar con este sistema y sugiriendo los fundamentos para su desarrollo. La naturaleza de esta definición de zonas de procedencias deja en evidencia que su aplicación y utilidad queda circunscrita a especies autóctonas (nativas y endémicas) y que no tiene sentido en las exóticas. Se abordan también las consideraciones genéticas que regulan estas decisiones y conceptos como migración asistida, modelamiento de nicho ecológico y zonas genéticas como complementos a la definición de zonas de procedencia tradicionales.

LAS ZONAS DE PROCEDENCIA

Los árboles de un bosque natural tienen un alto grado de adaptación al ambiente local, la que transmiten a sus semillas mediante los mecanismos de herencia genética. Las semillas por su parte se dispersan a distancias relativamente limitadas en relación a sus progenitores, lo que les permite encontrar un ambiente similar donde germinar y desarrollarse. Sin embargo, en la repoblación artificial la distancia entre el sitio donde se producen las semillas y el sitio de plantación se incrementa en forma considerable, de modo que no existe garantía que el material genético esté adaptado a las condiciones ambientales en que se implanta.

Las diferencias entre poblaciones de una misma especie que ocupan distintas regiones se pueden atribuir, en parte, a procesos de modificación fenotípica como respuesta a las distintas

¹⁷ Contaminación genética es una expresión habitual para referirse a la depresión exogámica de una población local por la acción de genes de una población introducida de la misma especie, o de una especie distinta reproductivamente compatible.

condiciones climáticas y edáficas locales, fenómeno conocido como plasticidad fenotípica. Sin embargo, existen importantes diferencias que tienen una base genética y han sido objeto de selección durante múltiples generaciones. Estas diferencias genéticas son la base sobre la que se establece la delimitación de las zonas de procedencia de las especies forestales.

Definiciones y Conceptos Generales

La existencia de diferencias genéticas entre poblaciones, principalmente las ligadas a caracteres de crecimiento, producción y adaptación, ha motivado la definición de grandes unidades para la comercialización y utilización de semillas. Para las especies a las que se aplica un sistema de certificación de materiales de reproducción, se definen unidades de comercialización, que corresponden a divisiones en su distribución geográfica en grandes regiones. Esta unidad básica, en el esquema de la Unión Europea (UE) y de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), es la Región de Procedencia¹⁸.

La Zona de Procedencia es para una especie o subespecie determinada, la zona o el grupo de zonas sujetas a condiciones ecológicas suficientemente uniformes en las que se encuentran fuentes semilleras o rodales que presentan características fenotípicas o genéticas semejantes (Alía *et al.*, 2009a). También se la define como el conjunto de territorios sometidos a condiciones ecológicas prácticamente uniformes y en los que se desarrollan poblaciones que presentan características fenotípicas o genéticas análogas (Agúndez *et al.*, 1995). Estas definiciones son en alguna medida coincidentes con la de "Zonas Semilleras" de Barner y Willan (1983); las regiones de procedencia de Martin *et al.* (1998); y con la definición de García del Barrio *et al.* (2001) para las "Regiones de Identificación y Utilización de Material Forestal de Reproducción" (RIU).

De acuerdo con Alía *et al.* (2009a) esta unidad, la zona de procedencia, es la unidad básica de comercialización de material de reproducción (frutos, semillas, plantas y partes de planta) en los sistemas de certificación de la UE y de la OCDE, y corresponde a una división establecida a partir de criterios genéticos, geográficos y ecológicos para facilitar la comercialización de los materiales de reproducción y su identificación por parte del comprador, pues permite identificar más fácilmente las características de los materiales de reproducción.

En Estados Unidos se sugiere como definición de zona semillera a "una zona de árboles con una composición genética relativamente uniforme, determinada a través de la evaluación de la progenie de varias fuentes de semillas, donde generalmente el área incluida tiene límites geográficos, clima y condiciones de crecimiento bien definidos".

Por su parte, la OECD (1974) usa el concepto de región de procedencia como el "área o conjunto de áreas con condiciones ecológicas suficientemente uniformes en las cuales se encuentran rodales que muestran características fenotípicas y genéticas similares" (Barner y Willan, 1983).

Aplicación e Importancia de las Zonas de Procedencia

Las especies forestales presentan una gran variabilidad. Dentro de sus áreas de distribución pueden existir complejos de poblaciones con grandes diferencias entre ellas en numerosos caracteres relacionados con la adaptación a distintas condiciones ecológicas. Estas diferencias pueden tener un marcado reflejo en el crecimiento, sanidad, desarrollo y consecuentemente en su producción (Agúndez *et al.*, 1995). Por lo mismo, es ampliamente aceptado que en cualquier trabajo de repoblación forestal es de gran importancia conocer el origen o procedencia del material que se va a establecer.

¹⁸ Como expresión equivalente se prefiere usar "zonas de procedencia", pues en algunos contextos el término región se presta a confusión con las unidades de división administrativa del país.

El empleo de una fuente de semillas de procedencia inadecuada puede hacer que la masa que se obtenga no sea la esperada, e incluso, en casos extremos, que la plantación sea un fracaso por no adaptarse a las condiciones ecológicas del sitio. Para evitar estos fracasos, lo ideal es disponer de ensayos de procedencias y en base a sus resultados seleccionar los materiales a plantar en cada zona. Atendiendo a que la situación ideal no es la más frecuente, la medida práctica más conveniente es usar semillas de origen local o de un área ecológicamente similar a aquella donde se realizará la plantación; aun cuando, como se discutirá más adelante, el uso de semilla local no siempre es la opción correcta en todas las situaciones.

Además, si la plantación se efectúa al interior o próxima a una masa natural preexistente, empleando semilla obtenida de una población distante, se estará introduciendo material genético extraño, con el riesgo de alterar las características genéticas de la masa preexistente. Este fenómeno es especialmente delicado cuando se influye sobre poblaciones pequeñas o relictuales, cuya conservación debe efectuarse sin alterar su estructura genética. Sobre este particular, Pastorino y Gallo (2009) enfatizan que una elección errónea del material genético para forestar, en áreas en que la misma especie vegeta en forma natural, genera el riesgo de contaminación genética mediante la introgresión de genes exóticos (no locales) en las masas espontáneas. Este efecto puede ser irreversible y conducir a la pérdida irrecuperable del acervo genético local.

Un sistema de zonas (regiones) de procedencia o zonas semilleras resulta de utilidad para brindar las bases para muestreo genético, servir de guía para la transferencia de semillas en los programas de plantación y para proveer pautas que definan los límites geográficos máximos dentro de los cuales se pueden mezclar semillas.

Adicionalmente, como consecuencia de sus implicancias en aspectos genéticos y ecológicos, las zonas de procedencia tienen una importante aplicación en lo que respecta a regulación de producción, comercio y certificación de semillas. En efecto, las zonas de procedencia se definieron específicamente para regular estos aspectos, donde sus principales funciones son:

- Determinar los límites geográficos máximos dentro de los cuales se puede mezclar la semilla recolectada. Los lotes deben pertenecer a una única región de procedencia.
- Facilitar el comercio del material forestal de reproducción mediante la identificación de la región en la que se han recogido los frutos o semillas.
- Facilitar las recomendaciones de uso de las semillas

Delimitación de Zonas de Procedencia

Idealmente, una zona de procedencias debe estar delimitada de forma que quede constituida por una población de árboles que posean una constitución genética similar y esté definida por límites que puedan ser fácilmente reconocibles. En la práctica, se debe recurrir a soluciones que combinen razonablemente estas condiciones, basándose en aceptar la idea de que la similitud de condiciones ecológicas implica similitud en la constitución genética. Normalmente este criterio es el más utilizado para definir las zonas de procedencia.

El fundamento en que se basa la definición de zonas de procedencias para ordenar la distribución y utilización de semillas forestales, es que existe una relación entre las características del material genético utilizado en una región determinada y las características ecológicas del sitio de origen.

De acuerdo con CTGREF (1976) y Agúndez *et al.* (1995), la delimitación de regiones de procedencias puede efectuarse en forma divisiva o aglomerativa. Adicionalmente, puede diferenciarse en función del número de especies a que se aplica, pudiendo ser una definición de regiones de procedencias para una especie, para varias especies o para todas ellas.

El método aglomerativo une en una zona de procedencias a un conjunto de poblaciones naturales similares, en base a una caracterización ambiental y genética, de modo que cada zona de procedencias queda definida por la suma de varias masas discontinuas. Las principales limitaciones de este sistema se derivan de la necesidad de contar con un buen mapeo de las poblaciones existentes y con una caracterización genética de las mismas, generada a través del estudio de caracteres adaptativos o de marcadores genéticos neutros (Pastorino y Gallo, 2009). Por otra parte, no delimita zonas continuas, pero como contrapartida puede aunar zonas con mejor similitud genética, sin restricción de continuidad (Figura N° 1, der.).

El *método* divisivo es el comúnmente aplicado para especies de las que se cuenta con escasa información básica, como es la situación que enfrenta la mayoría de las especies del bosque nativo chileno. Consiste en la fragmentación del territorio en función de características ecológicas o ambientales, para llegar a definir áreas disjuntas con fronteras bien definidas y que posean características similares. El método se fundamenta en que las variables ambientales son determinantes, mediante procesos adaptativos, de los patrones de variación genética de las especies.

Este enfoque metodológico es el más usado en la mayoría de los países europeos y presenta la ventaja de definir una zonificación común, que puede ser utilizada simultáneamente para distintas especies (Figura N° 1, Izq.).

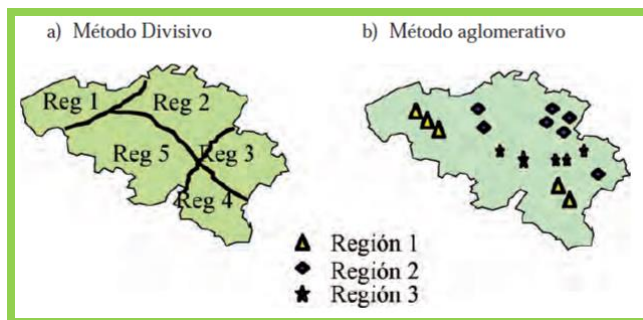


Figura N° 1
MÉTODOS DE DELIMITACIÓN DE ZONAS DE PROCEDENCIA

Los criterios para establecer las uniones (en el método aglomerativo) o divisiones territoriales (en el método divisivo) son, por un lado, la similitud ecológica y, por otro, la similitud en las características fenotípicas o genéticas de las masas forestales que habitan en ellas.

La aplicación práctica de ambos métodos difiere entre los distintos países (Cuadro N° 1), pues las regiones establecidas dependen de la información disponible sobre las especies o el territorio.

En general, el método divisivo requiere de menos información para su implementación y por lo mismo suele ser el más utilizado.

No obstante, con la expansión de las técnicas moleculares y análisis genéticos, el método aglomerativo comenzará a hacerse cada vez más frecuente.

Cuadro N° 1
MÉTODOS APLICADOS EN LA DELIMITACIÓN DE REGIONES DE PROCEDENCIA
EN DISTINTOS PAÍSES EUROPEOS

País	Método		
	Aglomerativo	Divisivo	
		Monoespecífico	Pluriespecífico
Alemania	No	Si	Si
Austria	No	No	Si
Bélgica (Flandes)	No	Si	Si
Bélgica (Valonia)	No	No	Si
España	Si	No	Si
Francia	No	Si	No
Gran Bretaña	No	No	Si
Italia	Si	Si	Si
Lituania	No	Si	Si
Noruega	No	No	Si
Polonia	No	No	Si
Rumania	No	Si	No
Suecia	No	No	Si

(Fuente: Alía *et al.*, 2009a).

Consideraciones para Delimitar Zonas de Procedencias Divisivas

Las condiciones ecológicas medias de cada zona de procedencia indican las diferentes condiciones ambientales a las que pueden haberse adaptado las poblaciones existentes en ellas. Aun así, en general se verificará que poblaciones autóctonas cercanas suelen estar genéticamente más próximas que dos poblaciones distantes, aun cuando estas tengan una gran similitud ecológica. Se debe tener en cuenta que la escala de trabajo para delimitar zonas de procedencia producirá una inevitable heterogeneidad en los factores ecológicos, aunque dado el elevado flujo genético que puede existir entre poblaciones adyacentes, permite asumir que esta heterogeneidad no dará lugar a una diferenciación genética considerable.

El hecho de trabajar en definición de límites de zonas de procedencias y no intentar mapear cada una de las procedencias existentes para cada especie, permite ordenar rápidamente el complejo de variación de las especies, definir un sistema de muestreo continuo y generar zonas en forma práctica y manejable.

Como consideraciones generales al momento de definir zonas de procedencia, se debe tener en cuenta que no es conveniente combinar en una misma zona a territorios que exhiben diferente tipo de clima. Es recomendable segregar como unidades distintas a áreas de clima uniforme (con poca fluctuación) respecto de otras con grandes oscilaciones, aun cuando los promedios sean similares. En este sentido, por ejemplo, la distribución de las precipitaciones a lo largo del año puede llegar a ser más relevante que el monto anual de las mismas. Complementariamente, los valores extremos de temperatura tienen mayor valor como variable de discriminación, que las temperaturas medias de cada zona.

Respecto a los suelos, aun cuando su valor como variable de segregación de zonas de procedencias es menor que el del clima, se aconseja no delimitar zonas que incluyan una heterogeneidad excesiva de suelos, particularmente no incluir en una misma unidad terrenos con suelos de características opuestas (suelos ácidos y básicos; arenosos y arcillosos, etc.).

La altitud es un factor que se relaciona directamente con la expresión de variables edafoclimáticas, de modo que no resulta aconsejable que una zona de procedencias incluya variaciones mayores a 400 metros.

Por otra parte, deben tenerse en cuenta algunas consideraciones de carácter práctico, las que si bien involucrarán algún grado de sacrificio de la homogeneidad al interior de cada zona, como contrapartida contribuirán a facilitar la delimitación, acotar el número de unidades y facilitar la utilización del sistema propuesto. Entre ellas y como una característica propia del sistema divisivo, las zonas de procedencia deberán corresponder a unidades geográficamente continuas, con límites bien definidos y fácilmente distinguibles. En este aspecto, es importante que prevalezca un criterio de unidad geográfica y evitar una fragmentación que produzca un número excesivo de unidades. En ocasiones deberá sacrificarse precisión en la definición de los límites y reemplazar fronteras minuciosas por otras similares de carácter práctico, más fáciles de definir y reconocer en terreno. Los cursos de ríos y fronteras administrativas pueden ser de utilidad en esta situación.

En general la definición de zonas de procedencia utiliza distintos criterios, aunque habitualmente se tienen en cuenta los ecológicos (clima, geología, suelo), los geográficos, los de distribución de la vegetación, los económico-silvícolas y los relacionados con límites administrativos.

- **Aspectos Geográficos y Geomorfológicos**

El aislamiento geográfico es un factor de primer orden en la diferenciación genética entre poblaciones al provocar el aislamiento reproductivo entre ellas. Poblaciones que crecen en ambientes similares pueden ser genéticamente diferentes si no existe flujo genético entre ellas (Martín *et al.*, 1998). Por el contrario, la continuidad geográfica puede homogenizar la genética de las poblaciones que se desarrollan en ambientes distintos, siempre que esta proximidad implique la ausencia de barreras reproductivas.

En Chile los grandes elementos del paisaje, entendidos como franja costera, cordillera de la costa, valle central, precordillera y alta cordillera andina, definen claramente situaciones de diversidad ambiental con una relativa homogeneidad interna que a su vez fluctúa en sentido latitudinal. Tales elementos resultan de gran valor como base para una posterior división de zonas de procedencias.

- **Clima**

De todos los factores que determinan la definición de zonas de procedencias, el clima es el más importante en la adaptación de las especies forestales y sus poblaciones (García del Barrio *et al.*, 2001). En base a la clasificación de climas de Chile se puede determinar a grandes rasgos zonas con condiciones similares.

No se consideran a este nivel las variables edáficas, ya que según Schlatter *et al.* (1994), para una subdivisión territorial a una escala nacional o regional el factor que tiene mayor influencia en definir condiciones similares es el clima. La condición edáfica define el sitio a una escala mucho menor (Vergara *et al.*, 1998).

Considerando el criterio climático, se pueden usar enfoques como el de ordenamiento de la tierra (Schlatter *et al.*, 1994; 1995), que consiste en una división del territorio valiéndose de la variación longitudinal y latitudinal del clima. En este sistema se establecen "zonas de crecimiento" (variación longitudinal) y "distritos de crecimiento" (variación latitudinal).

- **Altitud**

Puesto que el efecto altitudinal es uno de los más importantes, pues se relaciona con cambios de clima y de suelo, normalmente se le considera como un factor esencial a la hora de efectuar zonificaciones. Al respecto existen algunas consideraciones a tener en cuenta, entre ellas no trasladar semillas a zonas con más de 400 m de diferencia de

altitud, o equivalentemente no incluir diferencias de altitud superiores a 400 m en una misma zona de procedencia.

- **Suelo**

La adaptación de las especies a las condiciones edáficas no es tan estricta como lo es a las climáticas, destacando que la recomendación general es no plantar en suelos ácidos con semillas provenientes de árboles que crecen en suelos básicos o viceversa. Tampoco trasladar de suelos arenosos a arcillosos.

Para que se produzca adaptación a condiciones edáficas particulares, estas deben cubrir zonas amplias donde el flujo genético con poblaciones adyacentes, que presenten características edáficas diferentes, sea lo suficientemente pequeño para permitir la selección de los genotipos más adaptados (García del Barrio *et al.*, 2001).

- **Vegetación**

La vegetación puede ser usada como un indicador de variación ambiental. Los cambios vegetacionales existentes en un territorio son de una gran relevancia para poder identificar barreras climáticas y frenos en los flujos de genes.

Estos cambios pueden ser específicos, involucrando a una o pocas especies, o bien generales, en los cuales existe un cambio que aun cuando es gradual, implica la desaparición completa de grupos de especies, para dar paso a otras asociaciones vegetales.

Distinta información derivada del estudio de la vegetación puede ser de utilidad para definir zonas de procedencia. En una primera instancia la distribución de los tipos forestales puede contribuir a este objetivo. Evidencias de diferencias en el crecimiento y fenología de distintas especies también dan cuenta de diferencias ambientales o genéticas que ameriten ser consideradas en la definición de zonas de procedencias.

- **Otras**

Según Vergara *et al.* (1998), en Chile las cuencas de los ríos principales están distribuidas de tal forma que van sucediéndose a medida que avanza la latitud y cambia el clima. Por ello, y considerando que la cuenca es una unidad ideal en la que fenómenos como dispersión del polen y semilla deberían formar un sistema relativamente cerrado, es una forma interesante para diferenciar poblaciones que se muestran continuas.

Zonas de Procedencia en Chile

En Chile no se ha implementado un sistema oficial de zonas de procedencia para el material de reproducción de las especies forestales nativas. La utilización de material sin consideraciones de adaptabilidad de las especies nativas puede originar pérdidas económicas y de diversidad genética, ejemplo de esta situación se da comúnmente cuando se utilizan semillas forestales de otras regiones o zonas del país sin considerar aspectos tales como la adaptabilidad al sitio, en particular a la altitud y latitud (clima).

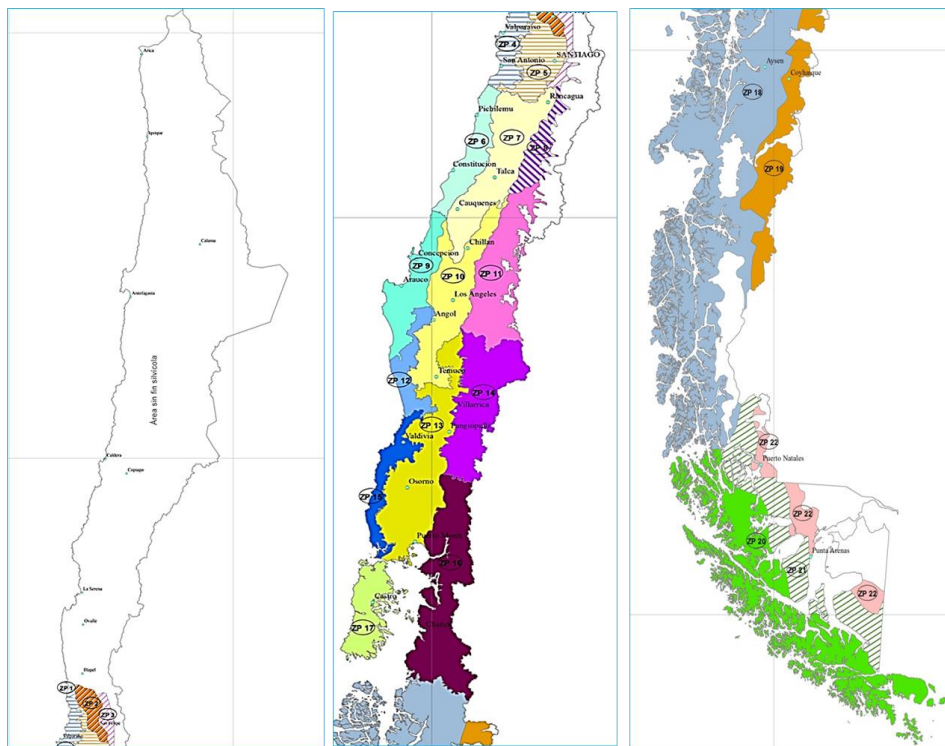
La información disponible sobre la variación de las especies se utiliza en pocos casos, y casi siempre en el planteamiento general del problema, ya que esta información suele ser incompleta y referida a pocas poblaciones. En el mejor de los casos los datos procedentes de ensayos de procedencias-progenies y de marcadores bioquímicos pueden ser utilizados para precisar los límites entre las zonas, aun así, para las especies forestales nativas de Chile esa es una información de la que no se dispone en forma generalizada, situación que enfatiza la necesidad de recurrir a una zonificación de carácter fundamentalmente ambiental o ecológico para

definir las zonas de procedencias nacionales (método divisivo).

En el marco del proyecto FONDEF D96-I1052 Mejoramiento Genético para Especies de *Nothofagus* de Interés Económico, Vergara *et al.* (1998) definieron zonas de procedencia en base al método divisivo para las especies roble (*Nothofagus obliqua*) y raulí (*N. alpina*)

En el curso del proyecto D98-I1075 "Mejoramiento Genético para la Primera Generación de Coigüe y Laurel en Chile" se aplicó el mismo procedimiento para definir zonas de procedencia para coigüe (*Nothofagus dombeyi*) y laurel (*Laurelia sempervirens*).

Posteriormente, Quiroz y Gutiérrez (2014), en el marco de una propuesta de reglamento para semillas y plantas forestales, desarrollaron un mapa de zonas de procedencias orientado a normar y regular el origen de las semillas de especies forestales nativas. Este instrumento correspondió a una aplicación del método divisivo, de aplicación multiespecífica, donde se divide el área de interés silvícola del país, desde la región de Coquimbo a la de Magallanes, en 22 zonas de procedencias relativamente homogéneas en base a información de clima, fisiografía vegetación y suelos (Figura N° 2).



(Fuente: Quiroz y Gutiérrez, 2014)

Figura N° 2
MAPA DE ZONAS DE PROCEDENCIAS PARA ESPECIES FORESTALES NATIVAS

ENFOQUES COMPLEMENTARIOS A LA DEFINICION DE ZONAS DE PROCEDENCIA

Zonas Genéticas

Un enfoque complementario relacionado con la definición de zonas de procedencias es la definición de zonas genéticas. Pastorino y Mondino (2016) diferencian ambos conceptos indicando que una zona genética es un grupo de poblaciones naturales con continuidad geográfica que guardan cierta similitud genética verificada con marcadores genéticos, mientras que una región de procedencia es un grupo de poblaciones naturales con continuidad geográfica que pertenecen a una misma zona genética y de las cuales se esperan similares respuestas adaptativas.

Alternativamente, la zona genética puede considerarse también como una situación particular de zonas de procedencias aglomerativas, donde el criterio de aglomeración ha sido la similitud genética determinada con marcadores moleculares.

En cualquier caso, independiente de los matices de diferencia o similitud entre ambos conceptos, la caracterización genética molecular es una herramienta poderosa y de uso cada vez más frecuente para estudiar y zonificar poblaciones naturales.

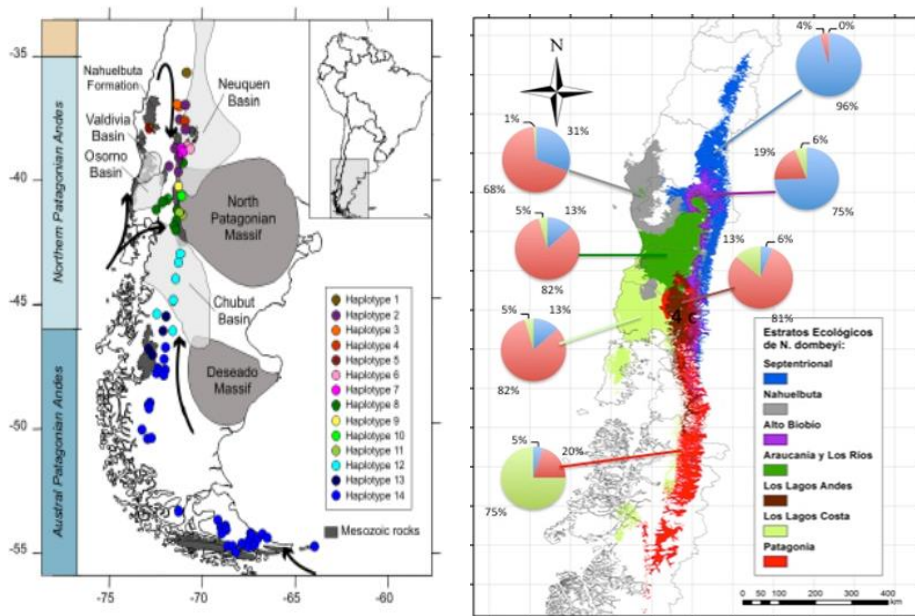
Azpilicueta *et al.* (2016) indican que las zonas genéticas están conformadas por bosques que tienen composiciones genéticas similares entre sí, unidos por un acervo genético común. Esto permite inferir que los individuos con una historia evolutiva común, compartiendo una misma zona genética, están adaptados a condiciones similares del ambiente, siempre teniendo presente que la información surge de marcadores neutros que no están sometidos a procesos de selección. Por definición, las zonas genéticas son regiones genéticamente homogéneas dentro de las cuales el efecto de la transferencia de material, ya sea seminal o vegetativo, genera un impacto mínimo a nivel de su estructura genética.

Los autores mencionados añaden que la identificación de zonas genéticas conforma una instancia previa a la definición de regiones de procedencia, donde además se incorpora información sobre la respuesta adaptativa del material, a partir de la evaluación de caracteres cuantitativos en ensayos o inferida con base en las condiciones ambientales homogéneas de la zona.

Para la definición de las zonas genéticamente homogéneas de raulí y roble en Argentina se realizaron análisis de agrupamientos en base a la composición genética de las poblaciones, determinada a través de los marcadores moleculares. La primera zonificación se realizó con los marcadores microsátélites por su característica de alto polimorfismo; el análisis a partir del estudio del ADN de cloroplasto se utilizó como información complementaria. Dadas las características de este último marcador, principalmente aquellas asociadas a su baja tasa de cambio o mutación, permite discriminar dentro de un mismo grupo, orígenes distintos que ameriten una distinción al agrupamiento realizado con los microsátélites. El estudio permitió determinar cinco zonas genéticas para raulí y tres para roble (Azpilicueta *et al.*, 2016).

Mathiasen y Premoli (2010) analizan las poblaciones argentinas de lenga (*Nothofagus pumilio*) con marcadores de ADN de cloroplastos, proponiendo dos grandes zonas genéticas al norte y sur del paralelo 42° S (Figura N° 3).

Por su parte, en Chile, Hasbún (2015) en el contexto del proyecto FIBN068/2012 Certificación Genética del Origen de Materiales Reproductivos de Coigüe Mediante Herramientas Moleculares y Modelos Ecológicos, hace uso de marcadores SNP y AFLP para determinar zonas genéticas de coigüe (Figura N° 3).



(Fuentes: Mathiasen y Premoli, 2010 (lenga); Hasbún, 2015 (coigüe))

Figura N° 3
DEFINICIÓN DE ZONAS GENÉTICAS PARA LENGUA EN ARGENTINA Y COIGÜE EN CHILE

Modelación de Nicho Ecológico y Clima Futuro

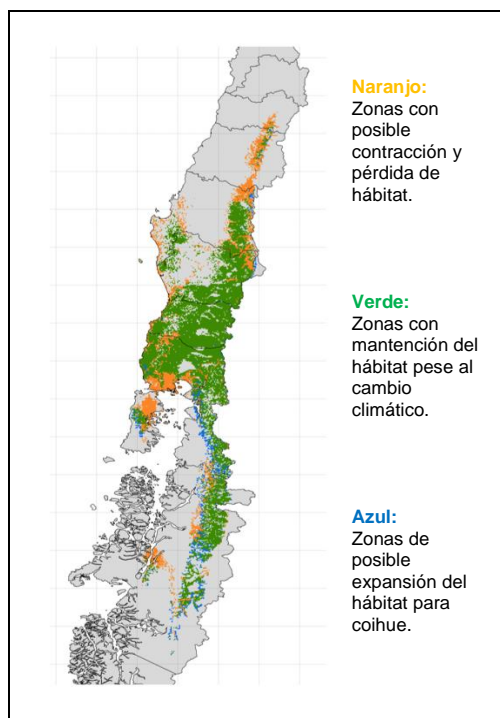
El cambio climático es un fenómeno global que con distinta intensidad afecta a toda la vida del planeta. Ante esta condición los árboles forestales pueden presentar tres respuestas clásicas: (i) Extinción, en las áreas donde las nuevas condiciones no les sean adecuadas; (ii) Adaptación, donde las condiciones ambientales lo permitan; y (iii) Migración hacia sitios que resulten más similares a su óptimo ecológico. Las tres opciones involucran cambios en los patrones de distribución y producen alteraciones en la definición de zonas de procedencias.

En tal escenario, para mejorar la definición de zonas de procedencias existen alternativas entre las que se destaca el modelamiento de nicho ecológico, que comprende la predicción de la distribución futura de especies según los pronósticos de cambio climático y el uso de la información de interacción genotipo-ambiente, derivada de ensayos de progenies y procedencias replicados en diversos sitios. Ambas son una ayuda para identificar fuentes de semillas apropiadas para un sitio en particular y el rango donde tales semillas pueden ser utilizadas sin pérdidas significativas de adaptación, de acuerdo a sus límites de tolerancia ecológica (Gutiérrez, 2017).

Alía *et al.* (2009b) plantean que una opción para predecir comportamiento de plantaciones y mejorar la definición de zonas de procedencia es el uso de modelos climáticos. Mediante la combinación de datos climáticos, topográficos y edáficos, junto con registros de presencia/ausencia de la especie en la actualidad, es posible modelar la distribución futura, es decir los sitios idóneos donde la especie puede habitar (Marchelli *et al.*, 2016) y que a su vez pueden ser una referencia para la implementación de iniciativas de migración asistida.

El aumento de temperaturas y reducción de precipitaciones, asociado al fenómeno de cambio climático, creará zonas con veranos más cálidos y secos, donde muchas de las formaciones vegetales se encontrarán en una baja idoneidad climática, con mayor riesgo para su supervivencia y estimuladas a migrar hacia áreas con mayor afinidad ecológica. Así, zonas que actualmente pueden resultar marginales o de difícil colonización se podrían convertir en lugares adecuados para esas especies. Consecuentemente, la regla que propone la procedencia local como idónea, puede no ser necesariamente cierta en un futuro y deja en evidencia el carácter temporal de la distribución de las especies y, por lo tanto, de la definición de zonas de procedencia (Alía *et al.*, 2009b).

Estudios de esta naturaleza efectuados en Argentina (Marchelli *et al.*, 2016) predicen que la distribución natural de raulí enfrentará una drástica reducción, mientras que roble al ser más tolerante a ambientes de menor precipitación, solo será afectado en determinadas localidades extremas, pero que su distribución sería incluso mayor que la actual. Resultados de un estudio similar efectuado por Hasbún (2015), para la especie coihue en Chile, se resumen en la Figura N° 4, donde se ilustran las áreas de reducción, ampliación y mantenimiento de su distribución como consecuencia del efecto del cambio climático.



(Fuente: Hasbún, 2015)

Figura N° 4
ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL HÁBITAT DE COIHUE
SEGÚN VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

¿MOVER O NO MOVER SEMILLAS ENTRE ZONAS DE PROCEDENCIA?

Regiones de Identificación y Uso de Semillas

Ya se esbozó que en escenarios de cambio climático la semilla local puede no ser necesariamente el material más adecuado para poblar un área determinada, no obstante, cuando no se dispone de información confiable que justifique el uso de otra fuente de semilla, lo más prudente es utilizar la fuente local.

Una finalidad de la definición de regiones de procedencia es caracterizar una especie a través de un conjunto de masas similares entre sí y relativamente distintas del resto, a lo largo del territorio geográfico en el que la especie se localiza. Sin embargo, existe la posibilidad de similitudes entre las masas que pueblan regiones geográficamente distantes, lo que abre el camino a homologaciones entre regiones favorables para el intercambio de material de reproducción entre sí (Alía *et al.*, 2009b).

En efecto, territorios o zonas de procedencia alejadas pueden tener características o respuestas fenotípicas similares para un material procedente de la misma zona de procedencia, o materiales de zonas distintas pueden producir masas muy productivas o bien adaptadas en otras zonas.

A partir de esos enunciados García del Barrio *et al.* (2001) desarrollan las llamadas regiones de identificación y utilización (RIU) del material forestal de reproducción en España, conformando un esquema que identifica para cada zona de procedencia de una especie en particular, los sitios fuera de esa zona donde puede establecerse la especie y esperar resultados satisfactorios.

Esta situación constituye uno de los casos donde, basándose en información y antecedentes de ensayos, se puede prescribir el uso de semilla no local para establecer masas forestales de adecuado desempeño.

Acervos Genéticos para Restauración

En acciones de restauración y plantación, y con el fin de mantener una estructura genética que asegure la adaptación de los genotipos al ambiente, la mejor alternativa consiste en utilizar material de propagación de la misma población a restaurar. Sin embargo, muchas veces el fuerte grado de deterioro de los bosques a intervenir impide implementar esta alternativa, constituyendo entonces una situación en que debe privilegiarse el uso de semilla foránea.

Tal escenario ocurre en condiciones de gran alteración, cuando no existen fuentes de semilla local, o cuando las fuentes existentes son pequeñas, de poca variabilidad genética y ya no resultan adecuadas para repoblar el sitio degradado.

En estas condiciones Broadhurst y Boshier (2014) señalan que las fuentes locales podrían no producir semilla de calidad para labores de restauración, indicando que la pérdida de diversidad genética puede requerir el uso de semillas desde poblaciones no locales.

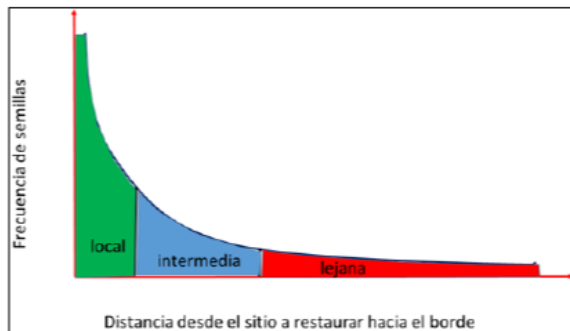
En estas situaciones, Jones (2003) y Jones y Monaco (2007) definen los denominados acervos genéticos para restauración (Figura N° 5), los que, en función de su proximidad o identidad genética con la población objetivo, los clasifican en cuatro categorías; desde el más parecido al material local (acervo primario), hasta el más distante (acervo cuaternario).

ACERVOS GENÉTICOS PARA RESTAURACIÓN		
Primario	Alta identidad genética con población objetivo. Incluye sólo material local y de poblaciones conectadas mediante flujo génico.	Local - Misma zona de procedencia
Secundario	Cuando no se dispone de primario. Corresponde a semillas colectada desde poblaciones de la misma especie pero no conectadas mediante flujo génico con la población objetivo	Misma u Otra zona de procedencia
Terciario	Especies o grupos taxonómicos relacionados con los del sitio objetivo, o híbridos entre aquellos y estos	Otras especies, otros orígenes, exóticas
Cuaternario	Considera especies o grupos taxonómicos que puedan cumplir papeles similares en la estructura y función ecosistémica que aquellos desempeñados por las especies de la población objetivo	

(Fuente: Elaboración propia a partir de Jones, 2003 y Jones y Monaco, 2007)

Figura N° 5
CARACTERIZACIÓN DE LOS ACERVOS GENÉTICOS PARA RESTAURACIÓN

El enfoque de los acervos genéticos de restauración reconoce la diferencia entre identidad genética y potencial de adaptación, sugiriendo que cuando el material local (acervo primario) es escaso, con poca variabilidad o ya no resulta apropiado para repoblar el sitio degradado, entonces se debe complementar con semillas de fuentes no locales (acervos secundario, terciario y cuaternario) con potencial de adaptación. En el mismo sentido, para efectos de restauración, Lowe (2010) sugiere utilizar mezcla de semillas donde se combinen en distinta proporción orígenes locales con otros más distantes respecto al sitio a restaurar (Figura N° 6).



(Fuente: Lowe, 2010)

Figura N° 6
COMPOSICIÓN DE MEZCLA DE SEMILLAS PARA RESTAURACIÓN

CONCLUSIONES

Las zonas de procedencias están concebidas para facilitar el comercio del material forestal de reproducción mediante la identificación de la zona en la que se han recogido los frutos o semillas. Ellas resultan de gran importancia debido a su incidencia en aspectos tan relevantes de una plantación, como lo son su adaptabilidad y la disminución de riesgos de contaminación genética de las masas autóctonas preexistentes. Por lo mismo, es altamente conveniente contar con una división de zonas de procedencia que oriente y regule el movimiento de semillas de las especies forestales nativas, aspecto que será de particular relevancia para apoyar iniciativas de restauración de bosques degradados.

Existen diversas alternativas para realizar tal zonificación, incluso existen algunas propuestas ya confeccionadas, las que podrían ser objetos de mejora en la medida que se disponga de más información y estudios genéticos que permitan caracterizar las poblaciones de las especies de mayor interés.

La distribución de las especies es un fenómeno dinámico que se altera y acelera con el cambio climático, luego la definición de zonas de procedencias también es temporal.

El uso de semilla local para iniciativas de plantación y restauración es una consideración prudente que debe tenerse en cuenta, pero también debe considerarse que no siempre el origen local es el más adecuado y que hay situaciones donde puede ser necesario o aconsejable utilizar orígenes foráneos.



REFERENCIAS

Agúndez, D.; Martín, S.; De Miguel, J.; Galera, R.; Jiménez, M. y Díaz-Fernández, P., 1995. Las regiones de procedencia de *Fagus sylvatica* en España. ICONA. Madrid, España. ISBN 84-8014-139-5. 104 p.

Alía, R.; Mancha, J.; Sánchez de Ron, D.; Barba, D.; Climent, J.; García del Barrio, J.; Notivol, E. e Iglesias, S., 2009a. Las regiones de procedencia de las especies forestales en Europa. En: Revista de la Asociación y Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Forestales, Foresta N°46. Pp: 44-48.

Alía, R.; García del Barrio, J.; Iglesias, S.; Mancha, J.; de Miguel, J.; Peragón, J.; Pérez, F. y Sánchez del Ron, D., 2009b. Regiones de procedencia de especies forestales en España. CIFOR-INIA. Dpto. Sistemas y Recursos Forestales. Madrid, España. 363 p.

Azpilicueta, M.; Marchelli, P.; Umaña, F.; Thomas, E.; Van Zonneveld, M. y Gallo, L., 2016. Definición de zonas genéticas como fuente de semilla en raulí y roble pellín en Argentina. En: Azpilicueta, M. y Marchelli, P. (Eds). Zonas genéticas de raulí y roble pellín en Argentina: Herramienta para la conservación y el manejo de la diversidad genética. INTA Ediciones. Bariloche, Rio Negro. Pp: 21-28

Barner, H. y Willan, R., 1983. El concepto de zonas semilleras. En: Unidades de recolección de semillas: Zonas semilleras. Nota técnica N° 16. Humlebaek, Dinamarca. Pp: 4-9.

Broadhurst, L. y Boshier, D., 2014. Seed provenance for restoration and management: Conserving evolutionary potential and utility. En: Bozzano, M.; Jalonen, R.; Thomas, E.; Boshier, D.; Gallo, L.; Cavers, S.; Bordács, S.; Smith, P. and Loo, J. (Eds.), 2014. Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. State of the World's Forest Genetic Resources. Thematic Study. Rome, FAO and Bioversity International. 281 p.

CTGREF, 1976. Semences forestieres. Les regions de provenances de picea común. CTGREF Note Tech. N° 30.

García del Barrio, J.; De Miguel, J.; Alía, R. e Iglesias, S., 2001. Regiones de identificación y utilización de material forestal de reproducción. Serie cartográfica. Secretaría General del Medio Ambiente. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. España. 293 P.

Gutiérrez, B., 2017. Regiones de procedencia: Un ordenamiento de Fuentes Semilleras. Presentación en curso Internacional Rehabilitación de Bosques Chilenos, Principios Genéticos: Iniciativa 20x20 y Desafío de Bonn. Instituto Forestal. Chillán 2 de noviembre de 2017.

Hasbún, R., 2015. Estudio de caso N° 4: Conservación de coigüe. Presentación en Curso Internacional de Conservación de Recursos Genéticos Forestales. INFOR FIA. Valdivia 21 al 25 de septiembre de 2015.

Jones, T., 2003. The Restoration Gene Pool Concept: Beyond the Native Versus Non-Native Debate. Restoration Ecology Vol. 11 N° 3, pp. 281-290.

Jones, T. y Monaco, T. A., 2007. Restoration Practitioner's Guide to the Restoration Gene Pool Concept. Ecological Restoration 25:1. March 2007 pp. 12-19.

Lowe, A J., 2010. Composite provenancing of seed for restoration: progressing the 'local is best' paradigm for seed sourcing. The State of Australia's Birds 2009: Restoring woodland habitats for birds. Compiled by David Paton and James O'Connor. Supplement to Wingspan 20(1) March.

Marchelli, P.; Azpilicueta, M.; Thomas, E.; Van Zonneveld, M. y Gallo, L., 2016. Distribución futura: Impacto del cambio climático global. En: Azpilicueta, M. y Marchelli, P. (Eds). Zonas genéticas de raulí y roble pellín en Argentina: Herramienta para la conservación y el manejo de la diversidad genética. INTA Ediciones. Bariloche, Rio Negro. Pp: 35-38.

Martin, S.; Díaz-Fernández, P. y De Miguel, J., 1998. Regiones de procedencia de especies forestales españolas: Descripción y principales características Géneros *Abies*, *Fagus*, *Pinus* y *Quercus*. Dpto. de Mejora y Biotecnología CIFOR-INIA. Unidad de Anatomía, fisiología y Genética ETSI de Montes. UPM. España. 22 p + anexos.

Mathiasen, P. y Premoli, A., 2010. Out in the cold: Genetic variation of *Nothofagus pumilio* (*Nothofagaceae*) provides evidence for latitudinally distinct evolutionary histories in austral South America. Molecular Ecology 19: 371–385

OECD, 1974. OECD Scheme for the control of Forest Reproductive Material Moving in International Trade. Paris, France.

Pastorino, M. y Mondino, V., 2016. Restauración de bosques nativos: La importancia del origen de las semillas. Actualidad El Cordillerano. 5 septiembre, 2016.

Pastorino, M. y Gallo, L., 2009. Definición de regiones de procedencia para las especies nativas de mayor potencial de domesticación: Resultados preliminares en ciprés de la cordillera. En: XII Congreso Forestal Mundial. Buenos Aires, Argentina. 18-23 de octubre de 2009. 7 p.

Quiroz, I. y Gutiérrez, B., 2014. Propuesta de reglamento para semillas y plantas forestales. Resultado del proyecto INNOVA Chile-CORFO 11BPC-9967 "Desarrollo de una propuesta de reglamento para semillas y plantas forestales". Instituto Forestal. Concepción, Chile. 74 p.

Schlatter, J.; Gerding, V. y Adriazola, J., 1994. Sistema de ordenamiento de la tierra. Herramienta para la planificación forestal aplicada a las Regiones VII, VIII y IX. Serie Técnica, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 114 p.

Schlatter, J.; Gerding, V. y Huber, H., 1995. Sistema de ordenamiento de la tierra. Herramienta para la planificación forestal aplicada a la X Región. Serie Técnica, Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 93 p.

Vergara, R.; Ipinza, R.; Donoso, C. y Grosse, H., 1998. Definición de zonas de procedencias de roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) y raulí (*Nothofagus alpina* (Poep. et Endl.) Oerst.). Estado de avance. En: Primer Congreso Latinoamericano IUFRO, "El manejo Sustentable de los Recursos Forestales, Desafío del Siglo XXI". Valdivia, 22 al 28 de noviembre de 1998.

