Informe Técnico N° 249

VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL TIPO FORESTAL ROBLE – RAULÍ – COIHUE DE LA REGIÓN DE LOS RÍOS. CHILE



INSTITUTO FORESTAL
2021

Las fotografías e imágenes incorporadas en tapas o texto de la presente publicación provienen de archivo institucional o fueron obtenidas o elaboradas durante el desarrollo de las actividades del trabajo que origina esta publicación.

Informe Técnico N° 249

Área Inventario y Monitoreo de Ecosistemas Forestales
Línea Adaptación y Mitigación al Cambio Climático

VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DEL TIPO FORESTAL ROBLE – RAULÍ – COIHUE DE LA REGIÓN DE LOS RÍOS. CHILE

Carlos Bahamondez[1], Carlos Buchner, Sabine Muller-Using,
Yasna Rojas, Bastienne Schlegel y Gerardo Vergara

[1] Instituto Forestal, Sede Los Ríos, Valdivia, Chile. cbahamon@infor.cl



INFOR

INSTITUTO FORESTAL
Sucre 2397. Ñuñoa
Santiago, CHILE
F. 223669115
www.infor.cl

ISBN N° 978 956 318 220 - 0
Registro Propiedad Intelectual N° 2022 A 1926

Se autoriza la reproducción parcial de esta publicación siempre y cuando sea efectuada la cita correspondiente:

Bahamondez, Carlos; Buchner, Carlos; Muller-Using, Sabine; Rojas, Yasna; Schlegel, Bastienne y Vergara, Gerardo, 2021. Vulnerabilidad al Cambio Climático del Tipo Forestal Roble – Raulí – Coihue de la Región de Los Ríos. Chile. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 249. P. 18. https://doi.org/10.52904/20.500.12220/31352

ÍNDICE

Introducción 1

Material y Método 1

Material 1

Método 2

Procedimientos y Resultados 4

Elaboración de Curva de Bienestar del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue en la Región de Los Ríos 4

Construcción de la Función de Bienestar y Función de Crecimiento 11

Identificación del Valor Umbral 12

Evaluación la Rentabilidad Económica del Esquema de Manejo Seleccionado 13

Caracterización de la Propiedad 15

Mapeo de la Vulnerabilidad para el Área de Interés 16

Conclusiones 17

Referencias 18

INTRODUCCIÓN

El propósito de este informe es reportar sobre la vulnerabilidad al cambio climático de las formaciones arbóreas del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue de la región de los Ríos, haciendo uso de un soporte metodológico que considera no solo los aspectos biofísicos de los bosques, sino también su respuesta ecofisiológica frente a nuevos escenarios climáticos y sus aspectos socioeconómicos. De esta forma, luego de colectar todos los antecedentes metodológicos, los datos e información pertinentes que caracterizan los escenarios futuros permiten contar con información relevante para sustentar propuestas de esquemas silvícolas apropiados para facilitar la adaptación al cambio climático.

IPCC (2001) define la vulnerabilidad como "*el grado en que un sistema*[2] *es susceptible, o es incapaz de hacer frente a los efectos adversos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y eventos extremos. La vulnerabilidad es una función del carácter, magnitud y tasa de variación del clima a que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación*". Esta definición incluye tres importantes términos, exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación, y que de hecho IPCC considera muy necesarios de incluir cuando se evalúa la vulnerabilidad. **Exposición** es la naturaleza y grado al cual el sistema es expuesto a la variación climática. **Sensibilidad** es el grado al cual un sistema resulta afectado ya sea positiva o negativamente, por estímulos climáticos. **Capacidad de adaptación** es la habilidad del sistema a ajustarse al cambio climático (CC) y responder a daños moderados, de tomar ventaja de las oportunidades generadas, o superar las consecuencias del CC. Si se considera a la vulnerabilidad como una medida de la capacidad de los sistemas para mantener su estado actual, esta perspectiva es ciertamente una guía que permite evaluar los sistemas ante una exposición a factores estresantes. Por lo tanto, es el interés de esta iniciativa el desarrollar una medida objetiva de vulnerabilidad con el fin de describir como los sistemas son potencialmente capaces de superar la exposición a los factores de estrés y sus consecuencias.

Como resultado en este informe se presenta un mapa de vulnerabilidad de los bosques del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue de la región de los Ríos y sus respectivas tablas de resultados.

MATERIAL Y MÉTODO

Material

El Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue se distribuye en la zona andina entre las regiones de Maule y Los Ríos. Estas regiones concentran la mayor parte de los bosques, así como la actividad de la industria forestal principalmente de plantaciones, produciendo madera para pulpa y madera aserrable para exportación. productos que sustentan la actividad económica sectorial dentro de esta área geográfica.

El área de estudio de este informe corresponde a las formaciones boscosas nativas del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue de la región de los Ríos contabilizando 252.801 ha según el Catastro Nacional de la Formaciones Vegetacionales de Chile de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) reportadas en el Sistema Integrado de Monitoreo de los Ecosistemas Forestales (SIMEF).

Los antecedentes cuantitativos de los bosques de esta región son tomados a partir de las bases de datos del Inventario Forestal Nacional de INFOR y los datos espaciales desde la base de datos cartográfica del mencionado Catastro Nacional. En la Figura 1 se describe la distribución general en la región de los Ríos del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue.

[2] Sistema incluye sistemas naturales y las personas, en adelante sistema bosque.

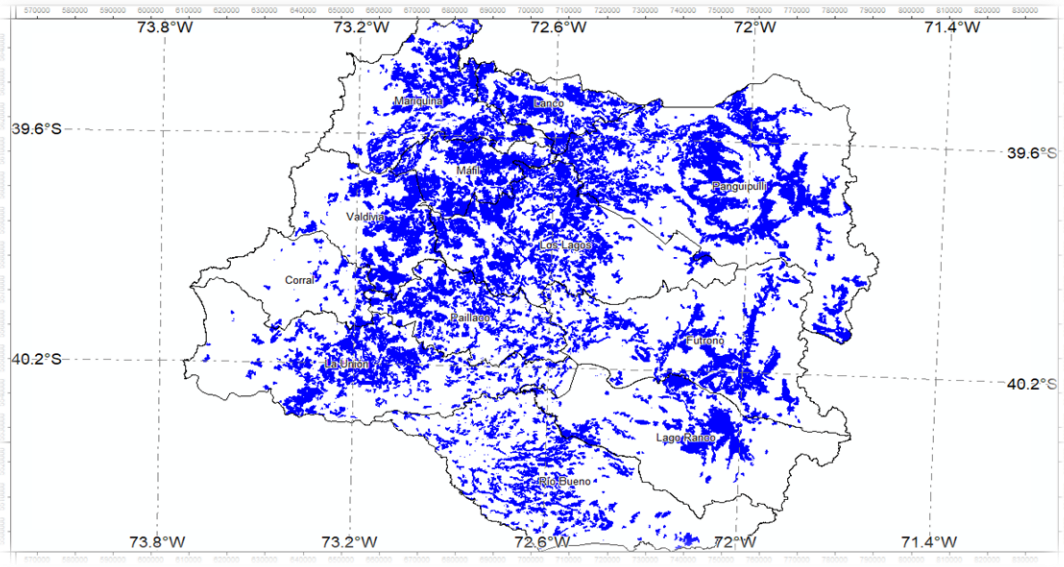

Figura 1. Distribución del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue en la región de los Ríos

En lo que se refiere a los antecedentes climáticos, se recurre a las proyecciones climáticas generadas por el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de Chile las cuales pueden encontrarse disponibles en el sitio del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia-CR2 (https://www.cr2.cl/simulaciones-regionales-regcm4/#RegCM4).

Método

Debido a la fortaleza de integrar aspectos biofísicos y socioeconómicos, metodológicamente se aplica el enfoque Luers *et al. (2003),* el cual implica construir una productividad de referencia, así como una curva de productividad que refleje el comportamiento de esta, en relación con uno o varios factores de estrés, en este caso estrés climático, función también conocida como la función de bienestar la que se explicita en forma genérica en la Figura 2.

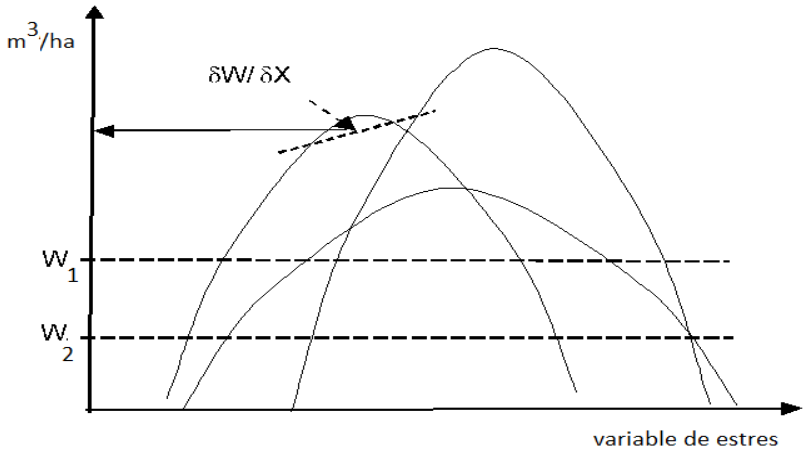

Figura 2. Determinación de la vulnerabilidad por definición de funciones de bienestar (productividad) por especies o grupos de especies (parábolas) y valores umbral (W_i con i=0,n)

De acuerdo a la Figura 2, la vulnerabilidad se calcula como la razón entre la sensibilidad y el estado del sistema, siendo la sensibilidad:

$$\text{sensibilidad} = \frac{\delta W}{\delta x} \quad [1]$$

con δW la variación de a productividad y δx la variación de la variable ambiental/climática.

y el estado:

$$\text{estado} = \frac{W}{W_0} \quad [2]$$

donde, W la productividad observada y W_0 el estado de referencia o valor umbral.

Definiendo vulnerabilidad como:

$$\text{Vulnerabilidad} = \left| \frac{sensibilidad}{estado} \right| \quad [3]$$

Adicionalmente se define la exposición[3], como:

$$exposición = \int vulnerabilidad\ px\ dx$$

Los siguientes corresponden a los pasos metodológicos necesarios para estimar la vulnerabilidad del sistema bosque a la acción del cambio climático en el área de interés. Estos conducen a la elaboración de la curva de bienestar del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue para la región de Los Ríos en toda su área de distribución regional, la determinación del valor umbral característico y el mapeo de la vulnerabilidad para la región comprende las siguientes etapas:

i) Subdivisión del área de estudio en bloques sistemáticos de 10 x 10 km asociados al escenario de proyección climática (RegCM4_rcp85) y a la base histórica.

ii) Elaboración de la máscara para el Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue de la región.

iii) Caracterización de las variables climáticas para cada unidad de muestra del inventario forestal nacional (IFN) comprendidas en la región para el tipo forestal de interés.

iv) Calibración del modelo ecofisiológico a los datos de base.

v) Elaboración de la curva de bienestar.

vi) Identificación del valor umbral, esto es identificando como valor umbral aquella productividad del bosque equivalente a obtener una rentabilidad con valor actual neto = 0.

vii) Tomando en cuenta los valores calculados de sensibilidad y estado para cada unidad de muestreo del IFN, la estimación de la vulnerabilidad de acuerdo a las expresiones [1], [2] y [3] y posteriormente la interpolación geoestadística por Kriging Ordinario para elaborar el mapa de la vulnerabilidad para el área de interés y Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue.

[3] En el contexto de este estudio no se estima.

PROCEDIMIENTOS Y RESULTADOS

Curva de Bienestar del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue en la Región de Los Ríos

- **Subdivisión del Área de Estudio**

El área de estudio conformada por los limites administrativos de la región de los Ríos fue subdividida en bloques sistemáticos de 10 x 10 km definida por los escenarios de proyección climática realizados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2007) (RegCM4_rcp85) y también el escenario histórico asociado a la misma grilla sistemática.

En la Figura 3 se detalla la disposición espacial de las cuadriculas que serán caracterizadas por sus parámetros climáticos en aquellas ubicaciones geográficas que contienen bosque del tipo Roble-Raulí-Coihue.

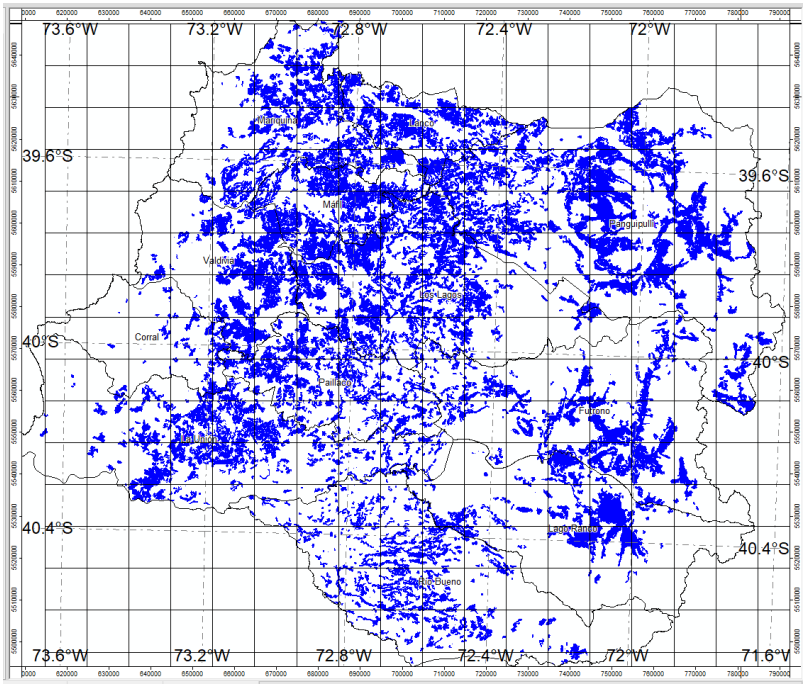

Figura 3. Detalle de cuadriculas para caracterizar vulnerabilidad

En la Figura 4 se entrega una visualización sinóptica de las superficies de línea base histórica (al 2005) y las superficies proyectadas por el modelo para el 2050 para las variables precipitación ($Kg/m^2/s$), radiación solar (W/m^2) y temperatura media anual (°K).

En la Figura 5 se describe el cruce entre el escenario climático histórico al año 2005 para la variable temperatura mensual y las posiciones geográficas asociadas a las unidades de muestreo del Inventario Forestal Nacional (IFN) para Roble-Raulí-Coihue en la región de los Ríos, donde los símbolos verdes corresponden a la localización geográfica de cada parcela de inventario del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue.

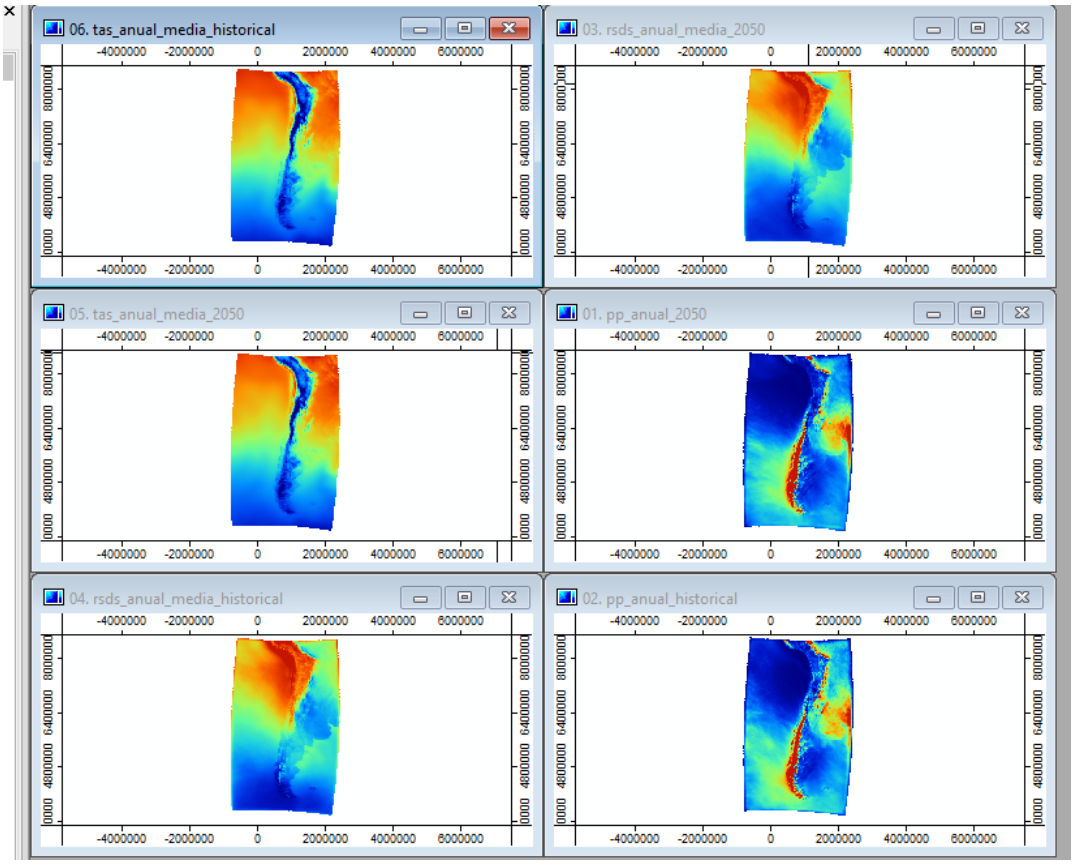

Figura 4. Superficies climáticas de línea base y proyectada al 2050 para temperatura media (°K), precipitación anual (Kg/m²/s) y radiación solar (W/m²)

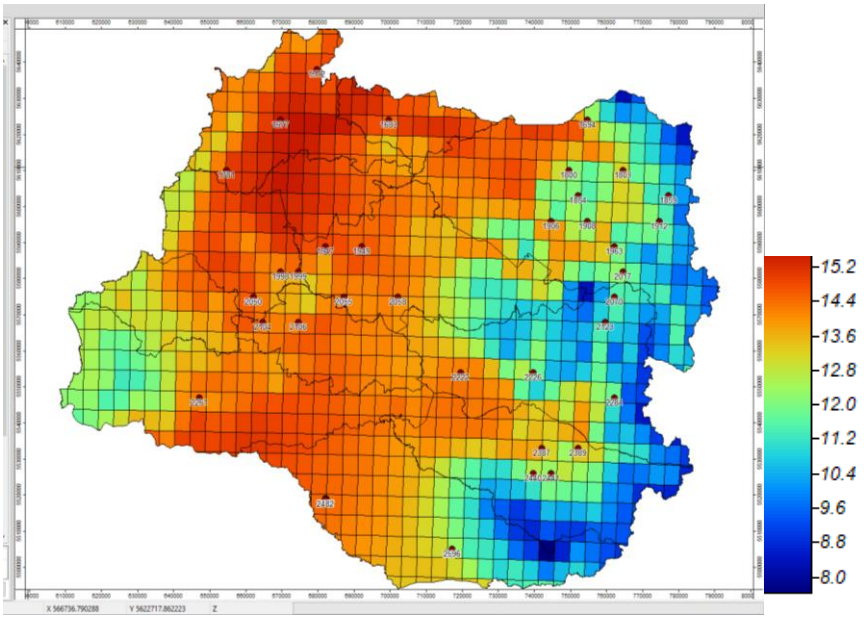

Figura 5 . Cruce registro histórico al año 2005 de temperaturas (°C) y muestras del IFN para Roble-Raulí-Coihue en la región de los Ríos

- **Caracterización de las Variables Climáticas**

A partir de los cruces de los escenarios climáticos con respecto a la ubicación de las parcelas de muestreo del IFN, se procede a caracterizar:

Situación Base

Como base de comparación se seleccionó el año 2005 en sus variables climáticas de promedios mensuales para las variables temperatura (°K), precipitación ($Kg/m^2/s$), radiación solar (W/m^2), y presión atmosférica (mm Hg).

Calibración de Parámetros del Modelo MoDiVe

El modelo MoDiVe (INFOR, 2020) comprende la parametrización de los siguientes elementos:

-Radiación fotosintéticamente activa: Corresponde a la radiación que efectivamente tiene la capacidad de interactuar efectivamente con el agua y el CO_2 a nivel celular. En general, las radiaciones de ancho de banda espectral más reducidas son más utilizados durante la fotosíntesis, principalmente el rango del violeta y azul, no obstante, la presencia de clorofila B y otros pigmentos permite también utilizar ancho de banda del rojo. Se destaca que las ondas de longitud en el rango del violeta y azul (~400-450 nm) y aquella en el rango del rojo (~600-670 nm) son las longitudes de onda más empleadas para fotosíntesis, entre ambos tipos de clorofilas la fotosíntesis se realiza en forma más eficiente. En términos prácticos, la variable asociada corresponde al número de días del año con condiciones de radiación fotosintéticamente activa.

-Horas fotosintéticamente activas: Corresponde a la cantidad de horas del día que presentan buena calidad de radiación. En este estudio corresponde al periodo de tiempo en el que el Sol alcanza su cenit, el periodo de mejor capacidad fotosintética en un día es estimado de 4 a 6 horas, entre las 10 AM y las 14 o 16 PM.

-Eficiencia cuántica: Corresponde a la cantidad de moles de radiación por moles de CO_2 fijados.

-Área de copa efectivamente iluminada: En condiciones de bosque, solo una parte del dosel arbóreo es objeto de iluminación, por ello esta variable pretende reflejar esa cantidad de área de copas bajo iluminación fotosintéticamente activa. Se toma como estándar el área de copa iluminada cuando el Sol se encuentra perpendicular a la tangente horizontal proyectada por las copas.

-Densidad de la madera: Corresponde a la cantidad de madera sólida en peso seco por unidad de volumen.

-Precipitación: Nivel de agua lluvia caída durante el año.

-Humedad relativa: Cantidad vapor de agua contenida en el aire para determinada temperatura ambiente.

-Profundidad del suelo: Corresponde a la profundidad del suelo donde se pueden desarrollar las raíces. En el contexto de la modelación se considera la profundidad del suelo dividida en 7 subunidades para en cada una de ellas estimar la densidad de raíces.

-Presión atmosférica: Corresponde al peso que ejerce el aire en una determinada ubicación geográfica, su unidad de medida es mm Hg.

-Radiación: Corresponde a la cantidad de radiación disponible en una ubicación geográfica específica, su unidad de medida corresponde a kW/m^2.

-Porcentaje de radiación fotosintéticamente activa aprovechable: Corresponde a la cantidad efectiva de radiación fotosintéticamente activa que es aprovechada por las células. De toda la oferta de radiación que se da sobre la copa iluminada, se estima que solo entre un 2% y 6% es utilizado.

-Porcentaje de arena: Corresponde a la cantidad arena en porcentaje que participa en la textura del suelo.

-Porcentaje de arcilla: Corresponde a la cantidad de arcilla en porcentaje contenida en la textura del suelo.

-Contenido de agua en el suelo: Grado agua disponible en el suelo. Se calcula como:

$$\begin{pmatrix} H2O_{disponible} = 0.435 - 0.0006(PP_{referencia} - PP_{actual}) & si \;\; PP_{actual} \leq PP_{referencia} \\ H2O_{disponible} = 0.435 & si \;\; PP_{actual} > PP_{referencia} \end{pmatrix}$$

En función del déficit de precipitación ocurrido entre la precipitación actual y la precipitación proyectada a futuro.

-Glucosa producida: Corresponde a la cantidad de moles de glucosa producida (mol/m^2/s). El cálculo de los moles de glucosa producido considera las siguientes expresiones según Oleson *et al.* (2004).

-Tasa límite de fijación de carbono en presencia de la enzima Ribulosa-1,5-bifosfato carboxylasa-oxygenasa (RuBisCO).

$$w_c = \left\{ \frac{(c_i - \gamma_0) V_{max}}{c_i + K_c(1 + o_i/K_0)} \right\}$$

-Tasa de máxima fijación de carbono dada la capacidad de regenerar Ribulosa-1-5-Bifosfato (RuBP)

$$w_j = \left\{ \frac{(c_i - \gamma_0) 4{,}6\emptyset \propto}{c_i + 2\gamma_0} \right\}$$

-Tasa de fijación de Carbono

$$w_e = \{0{,}5\, V_{max}\}$$

Donde:

c_i : 1,65 $\frac{P_{atm}}{area\ copa}$ Concentración interna de CO_2 al interior de la hoja

o_i : 0,209 P_{atm} concentración de O_2

Siendo

P_{atm} : Presión atmosférica

K_c, K_0 : Constantes de Michaelis-Menten expresadas como

$$K_c = K_{c25}(a_{kc})^{\frac{T_v-25}{10}}$$

$$K_o = K_{o25}(a_{ko})^{\frac{T_v-25}{10}}$$

Siendo $K_{c25} = 30$ y $K_{o25} = 30.000$

y

$a_{kc} = 2{,}1$ y a_{ko}=1,2,

γ_0 : Punto de compensación de CO_2

Expresado como:

$$\gamma_0 = \frac{1}{2}\frac{K_c}{K_0} 0{,}21\ o_i$$

$\emptyset$: Radiación fotosintéticamente activa absorbida

Con, $V_{max} = V_{max25}(2{,}4)^{\frac{T_v-25}{10}} f(T_v)\ \beta_i$

Donde

β_i : Función limitante de humedad del suelo

$$\beta_i = \sum w_i r_i$$

Donde:

w_i sequedad del suelo y r_i proporción de raíces ambos en el nivel de la subdivisión 'i' del suelo según la expresión siguiente.

$$r_{i=}\frac{1}{2}\left[\exp\left(-r_a z_{h,i-1}\right) + \exp\left(-r_b z_{h,i-1}\right) - \exp\left(-r_a z_{h,i}\right) - \exp\left(-r_b z_{h,i}\right)\right]$$

Donde:

$z_{h,i}$ es la profundidad estimada desde la superficie hasta el límite definido entre la subdivisión i y la subdivisión i+1. Con r_a y r_b 7,0 y 2,0 respectivamente.

T_v : Temperatura de la vegetación (°C)
$f(T_v)$: Función de quiebre metabólico expresada como:

$$f(T_v) = \left[1 + exp\left(\frac{-22000 + 710(T_v + T_f)}{0{,}001 R_{gas}(T_v + T_f)}\right)\right]^{-1}$$

Con T_f temperatura de congelamiento y R_{gas} constante universal de gases

En consideración a los parámetros anteriores, se procede a calibrar las variables que complementan los parámetros requeridos por el modelo ecofisiológico MoDiVe, los que se detallan en figura a continuación.

La calibración consiste en estimar el valor de los parámetros del modelo que no son provistos como datos base y que permiten lograr el valor de crecimiento que se provee como verdad de terreno provenientes desde las unidades muestrales del IFN.



Figura 6. Parametrizacion del modelo MoDiVe

En la Tabla 1 a continuación se describen estos parámetros estimados.

Tabla 1. Datos climáticos asociados a la productividad de las unidades de muestral pertenecientes al tipo forestal Roble-Raulí-Coihue en la región de los Ríos

Conglomerado	Parcela	Vol/ha	Vol. Aserr/ha	Vol.pulp/ha	Crecimiento (m3/ha/año)	Temperatura media (°C)	Radiacion (kW m-2)	Radiacion fotosintetica actitva(%)	Area copa iluminada (m2)	Eficiencia Cuantica	Presion Atmosferica (mmHg)	Horas fotosintetic amente activas
1572	1	36,92	-	25,05	2,45	20	0,30	2	2.174,58	0,03	750	4
1677	1	289,60	189,87	75,58	3,30	25	0,30	3	1.153,63	0,06	754	6
1683	1	480,48	18,14	414,4	27,39	15	0,30	6	11.665,75	0,06	754	6
1694	1	247,42	23,32	118,06	4,83	20	0,24	3	2.894,56	0,03	750	4
1781	1	949,68	625,70	234,63	3,55	20	0,15	3	2.014,01	0,03	750	4
1800	1	504,78	-	366,22	7,70	18	0,30	3	3.930,78	0,045	752	4
1803	1	137,67	67,80	52,8	3,14	18	0,26	2	2.272,40	0,045	753	4
1854	1	239,62	-	153,28	4,19	18	0,18	2	4.481,72	0,045	753	4
1859	1	136,96	9,80	91,03	6,96	17	0,30	2	3.261,30	0,06	754	5
1906	1	264,07	-	141,43	4,50	18	0,30	3	2.238,02	0,06	752	4
1908	1	171,99	30,79	84,9	6,65	18	0,30	3	3.391,25	0,06	752	4
1912	1	253,81	48,96	158,66	13,30	22	0,30	4	5.368,98	0,02	746	5
1947	1	107,47	-	45,02	8,10	18	0,30	3	2.896,05	0,06	752	5
1949	1	727,99	-	307,85	9,30	19	0,30	2	4.315,78	0,06	751	5
1963	1	518,13	12,90	257,45	4,41	20	0,30	2	2.078,87	0,06	751	5
1998	1	7,29	-	7,28	0,54	22	0,20	2	657,96	0,022	747	4
1999	1	486,13	32,64	239,86	4,91	20	0,09	2	6.356,07	0,03	750	2
2017	1	258,17	16,70	145,49	4,92	15	0,30	3,5	2.531,96	0,06	754	4
2050	2	337,91	42,44	203,97	16,97	23	0,30	3,5	8.362,82	0,06	754	4
2050	1	379,16	9,12	260,09	18,14	24	0,30	3,5	8.977,59	0,06	754	4
2050	3	161,66	-	124,58	6,97	19	0,30	3	4.654,11	0,036	754	4
2055	1	206,93	-	74,43	16,88	17	0,30	4	5.890,90	0,06	754	6
2055	2	246,76	-	77,29	2,10	20	0,30	3	696,48	0,06	752	5
2055	3	45,94	-	18,73	0,82	20	0,30	3	271,34	0,06	752	5
2058	1	104,12	-	40,74	2,15	20	0,30	2	1.124,66	0,06	752	4
2070	1	902,43	-	409,04	6,48	20	0,30	4	2.787,58	0,06	752	4
2104	1	19,39	-	19,35	1,54	23	0,30	2	2.170,14	0,018	746	4
2106	1	432,98	167,33	124,29	3,80	18	0,30	3,5	1.752,24	0,046	752	4
2123	1	471,01	24,68	269,61	16,18	17	0,30	4	6.612,14	0,06	754	4
2222	1	140,03	-	140,06	7,38	17	0,30	2	3.620,29	0,06	754	5
2226	1	361,42	-	201,98	6,20	17	0,30	3	3.640,11	0,06	754	4
2261	1	203,52	70,39	120,6	8,50	17	0,30	3	5.571,91	0,06	754	4
2284	1	406,04	-	321,17	9,71	18	0,30	2	5.463,48	0,046	752	5
2387	1	170,66	65,57	66,53	3,50	18	0,30	2	1.708,52	0,046	752	5
2389	1	359,69	182,39	120,37	8,70	17	0,30	2,5	4.026,64	0,06	752	5
2440	1	787,93	117,87	345,04	5,32	18	0,30	3	3.253,95	0,046	752	4
2441	1	855,79	-	598,19	4,89	17	0,30	3	2.530,08	0,06	752	4
2482	2	164,03	-	59,27	4,39	17	0,30	3	1.674,54	0,06	752	5
2482	1	327,56	-	162,9	7,21	17	0,30	4	2.376,64	0,06	752	5
2482	3	79,02	-	54,48	2,13	17	0,30	4	693,66	0,06	752	5
2596	2	7,73	-	7,61	0,46	24	0,30	2	791,98	0,017	744	4
2596	3	2,69	-	2,69	0,14	24	0,30	2	222,11	0,017	744	4
2596	1	5,20	-	5,2	0,21	24	0,30	2	244,88	0,017	744	4

Tomando en cuenta los distintos parámetros descritos en la Tabla 1 para las distintas parcelas de muestreo, se caracteriza la situación media proveniente de los datos de terreno. Para elaborar estos valores medios se recurre al procedimiento a continuación.

Construcción de la Función de Bienestar y Función de Crecimiento

A objeto de obtener la productividad para una determinada condición geográfica, se definió como función de crecimiento a la función logística según la expresión siguiente:

$$V(t) = \frac{K}{[1+Aexp(-rt)]} \qquad [4]$$

Donde:

V(t) : Volumen al tiempo 't'
K : Máxima capacidad del sitio
A y r : parámetros ($A_{(t=0)}$)

Con,

$$\frac{\partial V}{\partial t} = r\left[1 + \frac{V(t)}{K}\right]V(t) \qquad [5]$$

Donde $\frac{\partial V}{\partial t}$ se estima desde el modelo ecofisiológico para las variables medias de estrés parametrizadas (Tabla 1) en: Horas de radiación fotosintéticamente activas (hPar), Eficiencia cuántica (Qefi), Radiación solar (RAD), Presión atmosférica (pAtm), Temperatura media anual (T°C), Porcentaje aprovechable de radiación fotosintéticamente activa (%PAR). Las expresiones [4] y [5] permiten estimar la productividad V(t) ante distintos valores de las variables climáticas conformando así la construcción de la curva de bienestar.

En la Tabla 2 se describe los vectores de estado promedio climáticos que caracterizan la curva de bienestar.

Tabla 2. Valores de variables climáticas para la elaboración de la curva de bienestar

ID Estresor	hPar	Qefi	RAD (kW/m²)	pAtm	T°C	%PAR	$\frac{\partial V}{\partial t}$ (m³/ha/año)	Productividad (m³/ha)
1	6	0,060	1,36	754	10	2,3	5,91	307,9
2	6	0,060	1,36	754	15	2,3	7,99	310.0
3	6	0,019	1,36	746	23	2,3	6,35	308,3
4	6	0,011	1,36	736	30	2,3	4,43	306,3
5	6	0,060	1,36	754	8	2,3	6,56	308,6

En la Figura 7 se describe la curva de bienestar resultante para el Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue de la región de Los Ríos.

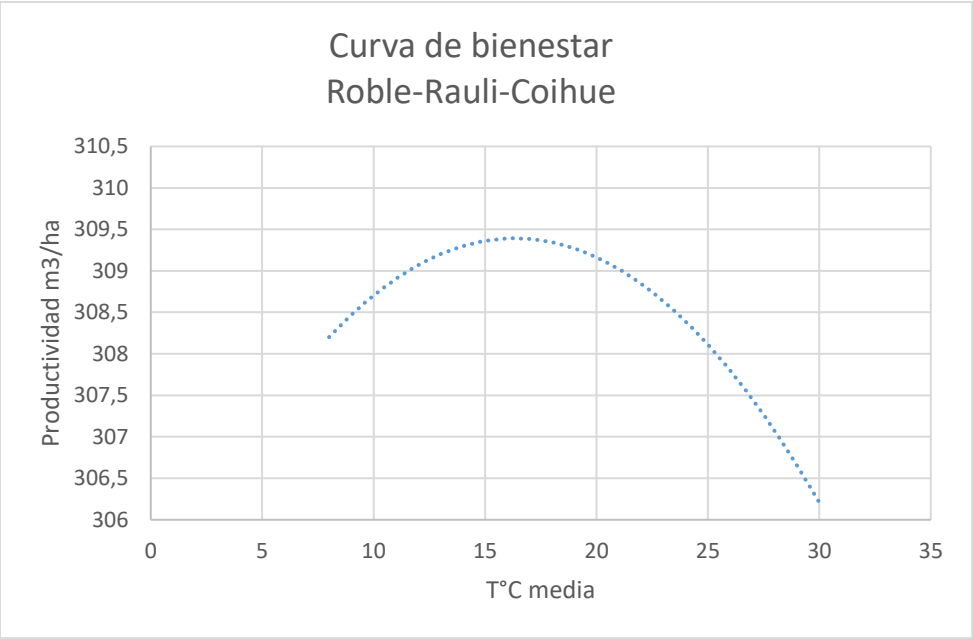

Figura 7. Curva de bienestar para Roble-Raulí-Coihue de la región de Los Ríos

En consideración a la curva de bienestar representada en la Figura 7, para propósitos gráficos se utiliza la variable temperatura media anual como variable indicadora clave, no obstante, es importante recordar que cada valor del eje de las abscisas corresponde a un vector conjunto de las variables descritas en la Tabla 1.

A partir de la curva de bienestar la sensibilidad del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue para la región de los Ríos se puede resumir de acuerdo a [1] como:

$$sensibilidad = \frac{\partial V}{\partial x} = -0.0342x + 0.559 \quad [6]$$

Con x : Temperatura media anual (T°C)

Identificación del Valor Umbral

Para identificar el valor umbral en m^3/ha se recurre a identificar esquema de manejo más factible para rodales de Roble-Raulí-Coihue

Se identificó como esquema de manejo promedio la opción de manejo coetáneo, la cual consiste en una corta de regeneración a la edad de 65 años, con dos cortas intermedias la primera a los 40 años y a los 55 años para un diámetro objetivo de 45 cm, esquema recomendado por Rojas *et al*. (2012).

Se asume una edad promedio inicial al momento de la primera intervención de 40 años.

En la Tabla 3 se describen los parámetros medios iniciales asociados a este escenario.

Tabla 3. Parámetros medios iniciales para evaluación

Manejo Coetaneo		
Volumen inicial	302	m^3/ha
Volumen aserrable (>24 cm.)	92	m^3/ha
Volumen Pulpable	157	m^3/ha
Volumen Leña	53	m^3/ha
Edad inicial	40	años
DMC Objetivo	45	cm
Crecimiento promedio	8	m^3/ha/año

Las existencias obtenidas en cada intervención se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Existencias obtenidas por cada intervención

Intervenciones	**Edad (años)**	**Vol Extracción (m^3/ha)**
Raleo 1	40	90
Raleo 2	55	90
Corta 1	65	120
Corta 2	70	130

Considerando una tasa de crecimiento promedio de 8,0 m^3/ ha/año al 2050-70 años, la tabla siguiente describe la distribución de productos obtenidas al final de periodo de proyección.

Tabla 5. Tabla de productos finales para el periodo de proyección

	Aserrable 24	**Metro Ruma**	**Leña**	**Total**
Intervenciones	**(m^3/ha)**	**(m^3/ha)**	**(m^3/ha)**	**(m^3/ha)**
Raleo 1	22,5	22,5	45,0	90
Raleo 2	27,0	18,0	45,0	90
Corta 1	48	24	48	120
Corta 2	52	26	52	130
Total				430

Evaluación de la Rentabilidad Económica del Esquema de Manejo Seleccionado

En consideración a los resultados en productos obtenidos para el periodo de proyección, se procede a evaluar económicamente estos resultados de forma de obtener como valor umbral aquella producción total que iguale el valor neto presente al valor cero. Los siguientes valores describen los precios asociados a los productos definidos en el esquema de manejo.

Tabla 6. Supuestos de precios asociados a los productos para la evaluación

Precios	(US$/m³)	($/m³)	Puesto en
Aserr 32 pellin	161,0	82.000	Aserradero
Aserr 24	97,5	30.000	Aserradero
Pulpa	41,3	16.250	Planta
Leña	46,3	27.200	Ciudad
Aserr 24 siemp	87,0	44.200	

Donde los ítems de costos asociados a las actividades para la producción generada por el esquema de manejo definido se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Detalle de costos asociados a la ejecución del esquema de manejo utilizado

Actividades de Cosecha	Aserrable	Cosecha Leña	Cosecha pulpable
	(US$/m³)		
Volteo- Maderero	27	10	10
Fajas caminos y otros	4	3	3
Transporte	18	13	13
Total	49	26	26
Total ($/m³)	39200	20800	20800
Administración ($/m³)	15		

En consideración a los resultados de la proyección resultante del esquema de manejo seleccionado y dado que el valor umbral está definido por aquel valor de producción que provoca un valor presente neto igual a cero, la distribución de productos que permite alcanzar este valor se describe en Tabla 8.

Tabla 8. Distribución de productos que logran un VPN=0

Productos	Raleo 1	Raleo 2	Corta 1	Corta 2	Total
	(m³/ha)				
Aserrable	0,00	0,00	2,75	15,86	18,61
Metro ruma	33,00	17,88	23,90	25,92	100,70
Leña	46,36	31,42	40,84	46,28	164,89
Total	79,36	49,29	67,49	88,06	284.20

De la Tabla 8, se desprende que el valor umbral corresponde a una existencia de 284,2 (m³/ha).

Caracterización de la Propiedad

Las propiedades asociadas al Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue que se encuentran dentro de los límites de la región de Los Ríos presentan las características detalladas en la Tabla 9, la que describe el comportamiento de la vulnerabilidad por zona fisiográfica y tipo de propiedad.

La Tabla 10 detalla el comportamiento de la vulnerabilidad por unidad fisiográfica y tamaño de la propiedad.

Tabla 9. Comportamiento de la vulnerabilidad por zona fisiográfica y tipo de propiedad

Unidad Fisiografica	Edad minima propietario (años)	Edad Maxima propietario (años)	Mínimo de escolaridad (años)	Máximo de escolaridad (años)	Superficie Predial minima (ha)	Superficie Predial maxima (ha)	Vulnerabilidad media
CA	37	73	2	12	22,45	100.200	0,93
CC	40	86	0	12	99,00	2.000	0,18
VC	51	73	6	12	27,00	1.000	0,05

CA: Cordillera de los Andes CC: Cordillera de la Costa VC: Valle central

Tabla 10. Vulnerabilidad por unidad fisiográfica y tamaño de la propiedad

Unidad Fisiografica	Propiedad <200 ha	Propiedad >=200 y <1000 ha	Propiedad >=1000 ha	Vulnerabilidad media
CA	2,22	0,10	0,09	0,93
CC	0,09	0,33	0,04	0,18
VC	0,06	0,05	-	0,05

CA: Cordillera de los Andes CC: Cordillera de la Costa VC: Valle central

Destaca de la observación de la Tabla 9 que la Cordillera de los Andes presenta los valores medios más altos de vulnerabilidad y que además concentra la mayor variabilidad de tamaños de propiedad.

Los propietarios de esta zona fisiográfica se caracterizan por un amplio rango de edad con una media de 55 años. En lo relativo a los años de escolaridad también presentan rangos amplios con una media de 9 años cursados.

En la Cordillera de la Costa estos rangos tienden a ser más amplios tanto en rangos de edad como en nivel de escolaridad, aunque su nivel de vulnerabilidad no es tan alto como la Cordillera de Los Andes, esto posiblemente se deba a la mayor presencia de muestras en bosques en la Cordillera de Los Andes por sobre la Cordillera de la Costa.

Por su parte el Valle Central de la región arroja los menores índices de vulnerabilidad y mejor estructura de edades y escolaridad de los propietarios.

La Tabla 10 muestra una clara tendencia del tamaño de la propiedad con la vulnerabilidad en la cordillera de Los Andes, donde predios más pequeños presentan altas vulnerabilidades respecto de predios grandes.

Mapeo de la Vulnerabilidad para el Área de Interés

Dentro de la región de Los Ríos, toda la región acusa un grado de vulnerabilidad al cambio climático, denotando que este afectará en grado diverso a las formaciones de bosques de Roble-Raulí-Coihue. A nivel local, se presentan matices de mayores vulnerabilidades por sobre otras situaciones, efecto principalmente gobernado por el comportamiento de las variables climáticas como las temperaturas, radiación solar y disponibilidad de agua a lo largo y ancho del territorio, esta última determinada por la reducción de las aguas lluvias. Localmente, las comunas de Valdivia y de Panguipulli destacan como aquellas que presentan las más altas vulnerabilidades. Dos efectos se denotan en el análisis de estas comunas, en el caso de la comuna de Valdivia, sus valores de vulnerabilidad dependen fuertemente de la capacidad productiva en ese territorio, el estado y condición de los bosques en las cercanías, y el tipo de propietarios que las componen, mientras que en el caso de la comuna de Panguipulli el efecto climático resulta el más preponderante.

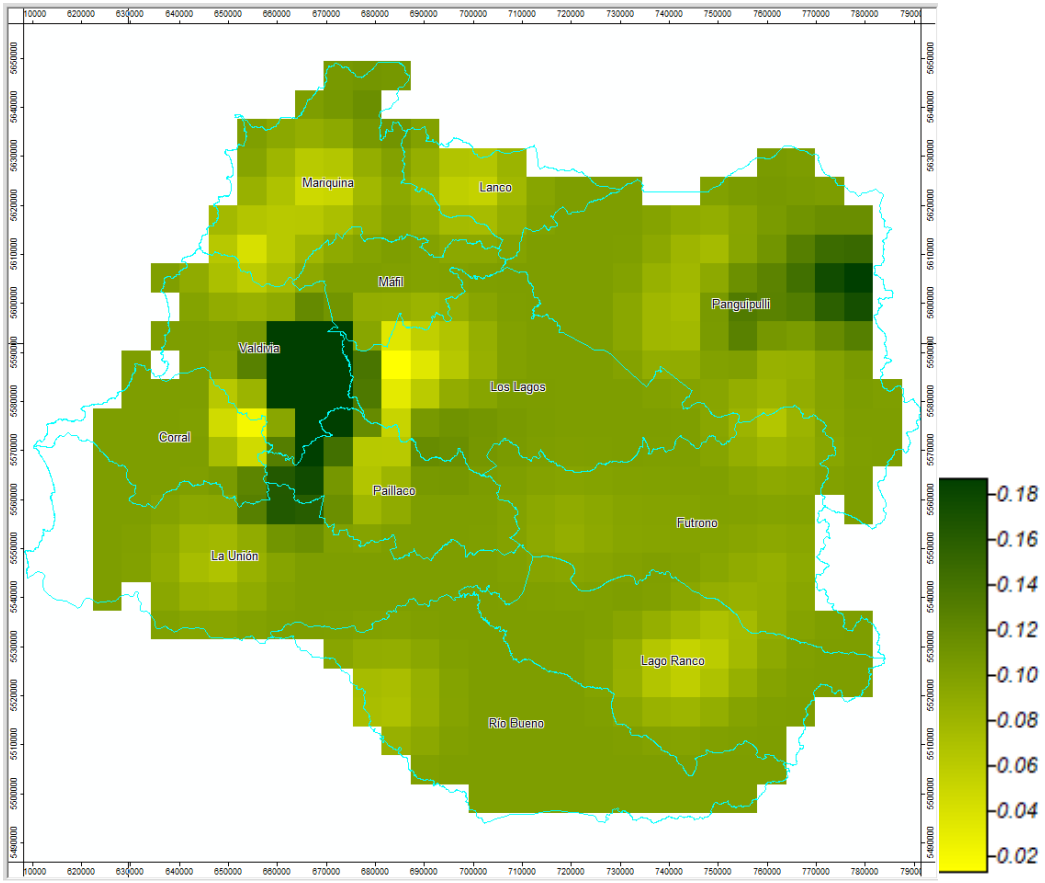

Figura 6. Vulnerabilidad de los bosques de la región de Los Ríos

La Figura 6 representa los grados de vulnerabilidad asociadas a las diversas comunas de la región de Los Ríos. En esta figura aquellos valores más altos representan una mayor vulnerabilidad. Se debe recordar que el grado de vulnerabilidad comprende el análisis de sensibilidad, el cual depende fuertemente del orden de magnitud producido por el cambio de variables climáticas y también la vulnerabilidad depende del estado y condición de los bosques, lo que tiene que ver con el tipo de manejo aplicado a las masas boscosas, el cual está fuertemente relacionado al perfil del propietario.

En la Tabla 11 se detalla el impacto en metros cúbicos para crecimiento que acumulan las comunas de la región de Los Ríos debido al efecto del cambio climático al 2050-70.

Tabla 11. Impacto del cambio climático en crecimiento por comunas

Comuna	Diferencia de crecimiento acumulado (m^3/año)	Superficies de Roble-Raulí-coihue (ha)	Pérdidas (m^3/año)	Ganancias (m^3/año)
Corral		3.072,3		
Futrono	(0,159)	26.598,2	4.229,1	
La Union	0,110	21.238,4		2.336,2
Lago Ranco	0,160	17.999,5		2.879,9
Lanco	(0,770)	12.348,2	9.508,1	
Los Lagos	0,447	33.227,7		14.852,8
Maífil		14.147,5		
Mariquina	0,086	18.641,3		1.603,2
Paillaco	0,040	13.428,8		537,2
Panguipulli	(1,500)	60.121,5	90.182,2	
Río Bueno	0,100	15.327,7		1.532,8
Valdivia	0,300	16.650,1		4.995,0
Total		**252.801,1**	**103.919,4**	**28.737,0**

En la Tabla 11 se aprecia que las comunas más afectadas por el cambio climático corresponden a Futrono, Lanco y Panguipulli. La región en 30 años plazo sufriría una pérdida de 3.464,0 m^3/año y una ganancia de 958,0 m^3/año, asumiendo una curva de adopción lineal, contabilizando una pérdida total en la oferta de 103.919,4 m^3 en toda la región, en el neto la región dejaría de percibir 75.180,0 m^3 de crecimiento.

Si se proyecta esta tendencia al 2070, la región de Los Ríos vería reducida su oferta de crecimiento en existencias en 173.200 m^3, con una ganancia de 47.900 m^3 y un neto a la pérdida de 125.300 m^3.

CONCLUSIONES

- La región de Los Ríos se ve afectada por el cambio climático de acuerdo a los escenarios proyectados al 2050-70 por el Departamento de Geofísica de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Chile.

- El uso de herramientas de análisis como el modelo de crecimiento de base ecofisiológica (MoDiVe) resulta útil para proveer antecedentes respecto de la magnitud del efecto del cambio climático en el crecimiento de los bosques de Roble-Raulí-Coihue comprendidos en la región de Los Ríos.

- La aproximación de Luers *et al.* (2003.) de estimación de la vulnerabilidad presenta varias ventajas al momento de estimar la vulnerabilidad, puesto que considera los aspectos socioeconómicos propios del propietario, así como los aspectos de productividad y sensibilidad de los ecosistemas forestales al cambio climático.

- Las principales variables climáticas que afectan el crecimiento de los bosques de Roble-Raulí-Coihue de la región de Los Ríos corresponden a la temperatura media del periodo estival, la radiación solar asociada al mismo periodo y la disponibilidad de agua, siendo esta última una de las más importantes con reducciones del nivel pluviométrico de entre 150 mm y 420 mm en la región.

- La magnitud neta del efecto del cambio climático en el crecimiento del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue en la región alcanza a una reducción del crecimiento de 75.180 m^3 al 2050 y 125.300 m^3 al 2070.

REFERENCIAS

INFOR, 2020. MoDiVe. Modelo dinámico de vegetación. Instituto Forestal Informe Final. Disponible en: https://ifn.infor.cl/

IPCC, 2001. Cambio Climático. Informe de síntesis., Tercer Informe de Evaluación, 2001 Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syrfull_es.pdf

Luers A.L.D.; Lobell, B; Sklar, L.S.C. and Adams, L., 2003. A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico. Global Environmental Change, 13 (2003) 255-267

Oleson, K.; Hoffman, F.M.; Houser, P.R. and Levis, S., 2004. Technical Description of the Community Land Model (CLM). National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado

Rojas, Y., Muller-Using, S.; Martin, M. y Muller-Using. B., 2012. Rentabilidad Económica se distintas propuestas silvícolas para los renovales de Nothofagus en el Centro Sur de Chile. Informe Técnico 193 Instituto Forestal INFOR.

Universidad de Chile, 2007. Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI. Departamento de Geofísica.



www.infor.cl