



ARTÍCULO

Vulnerabilidad de los bosques de montaña al cambio climático: primeros resultados de una investigación a largo plazo en la Comuna de Panguipulli, Chile.

Joceline Rose^{1*}, Sabine Müller-Using Wenzke¹ & Yasna Rojas Ponce¹

¹ Instituto Forestal, sede Los Ríos. Valdivia, Chile. jrose@infor.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.618>

Recibido: 4.12.2024; Aceptado 9.12.2024

RESUMEN

El presente estudio analiza la vulnerabilidad de los bosques de montaña al cambio climático, basado en una evaluación de la exposición y sensibilidad de las especies arbóreas dominantes de cuatro tipos forestales a lo largo de un transecto altitudinal en la comuna de Panguipulli, Región de Los Ríos, Chile, entre el año 2013 y 2023.

La vulnerabilidad estimada en un inicio del periodo del estudio fue baja para los tipos forestales Roble-Raulí-Coihue y Coihue-Raulí-Tepa y alta para los tipos forestales Lenga y Araucaria. Basado en el monitoreo de las condiciones de bosque en 22 parcelas permanentes, se observó un mayor crecimiento para los rodales del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue y Coihue-Raulí-Tepa y un menor crecimiento para Lenga y Araucaria, lo que se condice con el crecimiento esperado debido a que los dos últimos tipos forestales forman el límite altitudinal en esta localización. En términos de distribución de especies arbóreas, no se observó cambios de especies entre los rangos de elevación o tipos forestales a lo largo del transecto altitudinal.

Para evaluar si el crecimiento observado se ve afectado por el cambio climático, es necesario realizar un análisis detallado del crecimiento a nivel de especies dominantes, además de un análisis de la regeneración natural y de la vegetación acompañante, para poder proporcionar información básica para la detección temprana de cambios en la estructura y distribución de las especies a lo largo del gradiente altitudinal.

Palabras clave: Bosques de montaña, bosque templado lluvioso valdiviano, vulnerabilidad, cambio climático

SUMMARY

The present study analyzes the vulnerability of mountain forests to climate change based on an evaluation of the exposure and sensitivity of the dominant tree species of four forest types along an altitudinal transect in the commune of Panguipulli, Los Ríos Region, Chile, between 2013 and 2023.

The vulnerability estimated at the beginning of the study period was low for the Roble-Raulí-Coihue and Coihue-Raulí-Tepa Forest types and high for the Lenga and Araucaria forest types. Based on the monitoring of forest conditions in 22 permanent plots, higher growth is observed for the stands of the Roble-Raulí-Coihue and Coihue-Raulí-Tepa forest types and lower growth for Lenga and Araucaria, which is consistent with the expected growth because the last two forest types form the altitudinal limit in this location. In terms of tree species distribution, no species changes were observed between elevation ranges or forest types along the altitudinal transect.

In order to evaluate if the observed growth development is affected by climate change, it is necessary to carry out a detailed growth analysis at dominant species level. In addition, an analysis of natural regeneration and accompanying vegetation is necessary to be able to provide background information for early detection of changes in the structure and distribution of species along the altitudinal gradient.

Key words: Mountain forests, Valdivian temperate rainforest, vulnerability, climate change

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales de montaña se encuentran entre las regiones con mayor biodiversidad del mundo, ya que albergan el 85% de las especies de anfibios, mamíferos y aves a nivel global y casi una cuarta parte de los bosques del mundo se encuentran en regiones montañosas (Körner 2007; Rahbek *et al.*, 2019). La naturaleza compleja y heterogénea de la biogeografía y el clima de los ecosistemas forestales de montaña han limitado el estudio de su vulnerabilidad en el pasado, en comparación con otros ecosistemas forestales (Thakur *et al.*, 2021). La mayoría de los estudios identificados por Thakur *et al.* (2021) utilizan enfoques basados en modelos y escala regional, con solo unos pocos estudios de evaluación de la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales a escala local.

Un ejemplo de tales estudios son los de vulnerabilidad al cambio climático del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue en las regiones del Ñuble, Los Ríos y Los Lagos (Bahamóndez *et al.*, 2021; 2022; 2023), que se basan en los datos del Inventario Forestal Nacional de Chile, combinado con un modelo eco-fisiológico y análisis económico del uso maderero de los bosques. Uno de sus resultados es que la vulnerabilidad disminuye de norte a sur y es menor en los bosques de la cordillera que en aquellos del valle o la cordillera de la costa. En el caso de la Región de Los Ríos, la vulnerabilidad fue evaluada como alta en la comuna de Valdivia y Panguipulli (Bahamóndez *et al.*, 2021).

Al mismo tiempo, varios estudios han identificado que los ecosistemas de montaña son especialmente vulnerables al cambio climático y que las tasas de calentamiento son más rápidas a mayor altitud (Chakraborty, 2019; Delgado *et al.*, 2016; Freeman *et al.*, 2021; Pepin *et al.*, 2015). Esto pone de relieve la importancia de comprender cómo está afectando el cambio climático a los ecosistemas forestales de montaña, con el fin de desarrollar decisiones políticas, de conservación y de gestión eficaces a nivel local. Con este fin y el de desarrollar herramientas de gestión para la adaptación en cinco países de América Latina, entre ellos Chile, se ha implementado la iniciativa de investigación Climiforad en el año 2013 (Delgado *et al.*, 2016).

Los estudios realizados en este contexto usaron la metodología de evaluación de la vulnerabilidad sugerida por el IPCC (2007), la cual se basa en un enfoque socio-ecológico y utiliza tres elementos para describir la vulnerabilidad de un ecosistema y/o territorio: (i) La exposición al cambio climático; (ii) la sensibilidad de un ecosistema o especie específica a este; y (iii) la capacidad adaptativa social. La combinación de estos tres elementos determina finalmente la vulnerabilidad.

En Chile, el área de estudio comprendida en esta iniciativa es la comuna cordillerana de Panguipulli, ubicada en la región de Los Ríos, dentro de uno de los 36 *hotspots* globales de biodiversidad, precisamente en el de los Bosques Templados Lluviosos Valdivianos (CEPF, 2019). El presente estudio muestra la línea base de 2013 y primeros resultados después de 10 años de observación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Área de Estudio

El área de estudio corresponde al límite administrativo de la comuna de Panguipulli, provincia de Valdivia en la región de Los Ríos, ubicada entre los 39.73°S a 39.92°S de latitud y 71.83°E a 73.97°E de longitud en el centro-sur de Chile (Figura 1). La superficie de la comuna abarca 3.292 km² y cuenta con 34.539 habitantes, de los cuales el 55,8% vive en zonas rurales y el 42,8% pertenece a pueblos originarios, mayoritariamente al pueblo Mapuche (INE 2017).

La topografía de la comuna es de carácter cordillerano, dominado por montañas, quebradas abruptas asociadas a fenómenos de erosión glacial y montañas andinas con alturas de hasta 2.840 metros, que corresponden al Volcán Villarrica y al Volcán Mocho Choshuenco.

Según Köeppen-Geiger, adaptado por Sarricolea *et al.* (2017), el clima de la comuna está clasificado como templado lluvioso, con estación cálida y seca en verano (Cfb(s)). En las áreas de mayor altura de la comuna

se clasifica como templado mediterráneo con influencia montañosa y estación cálida en verano Csb(h) y templado mediterráneo con estación templada en verano (Csc) (Sarricolea *et al.*, 2017). La precipitación promedio anual del período histórico reciente (1980-2010) es de 2.558 mm en la ciudad de Panguipulli y de 4.440 mm en Puerto Fuy en el Lago Pihueico (ARClím, 2020). Entre los años 2013 y 2023, el promedio anual de temperatura fue de 8,7°C, con una temperatura promedio de 12,2°C en verano, 3,73°C en invierno y una precipitación promedio anual de 3.095 mm (ARClím, 2020).

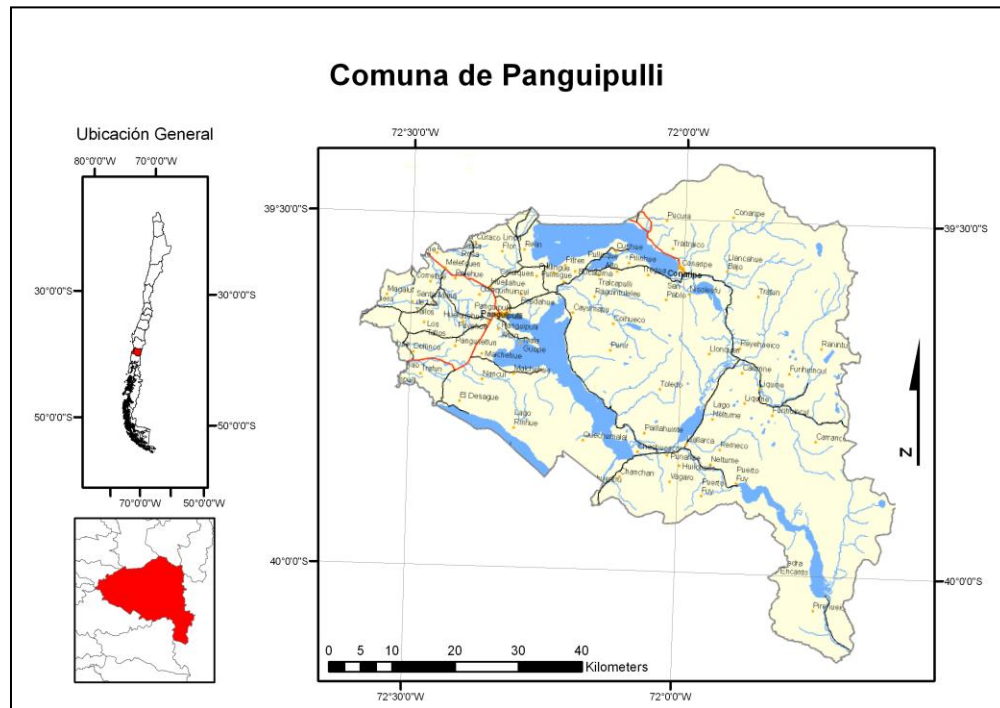


Figura 1: Mapa de ubicación de la comuna de Panguipulli

Los suelos de sectores de menor elevación en la comuna de Panguipulli son principalmente suelos trumaos derivados de cenizas volcánicas, profundos, con altos contenidos de materia orgánica y una alta capacidad de retención de humedad (Beinroth *et al.*, 1985). Los sectores de mayor elevación de la Cordillera de los Andes presentan suelos trumaos derivados de vidrios volcánicos, con texturas gruesas, una fuerte estratificación, baja fertilidad y baja retención de humedad (Beinroth *et al.*, 1985).

Los bosques nativos de la comuna de Panguipulli son bosques templados y forman parte de la ecorregión del bosque lluvioso templado valdiviano. La superficie total de bosque nativo en la comuna cubre el 64% y abarca 212.868 hectáreas distribuidos en 5 tipos forestales (CONAF, 2014; Cuadro 1).

Cuadro 1: Superficie de tipos forestales en la Comuna de Panguipulli, Los Ríos, Chile.

Tipo forestal	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Coihue-Raulí-Tepa	97.079	46%
Roble-Raulí-Coihue	60.121	28%
Lenga	37.879	18%
Araucaria	13.960	7%
Siempreverde	3.829	2%
TOTAL	212.868	100%

Muestreo de Datos

Se estableció 22 parcelas permanentes de 0,25 hectáreas (50 x 50 m) en bosque nativo del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue, Coihue-Raulí-Tepa, Lenga y Araucaria, cubriendo transectos altitudinales en rangos sobre 600, 800 y 1.000 msnm, con exposición norte y sur respectivamente (**Cuadro 2**).

Cuadro 2: Características generales de las parcelas permanentes.

Tipo Forestal	Parcela	Exposición	Altitud (msnm)	Coordenadas UTM	
Roble-Raulí-Coihue	1	Norte	667	248465	5581561
	15	Sur	669	252241	5582547
	16	Sur	722	251490	5582516
	17	Sur	668	251535	5582108
	18	Norte	721	247723	5586539
	19	Norte	813	248432	5586562
Coihue-Raulí-Tepa	4	Norte	650	247490	5582277
	5	Norte	725	249445	5580400
	10	Norte	858	256404	5593758
	11	Sur	806	243895	5596933
	12	Sur	914	253526	5584247
	13	Sur	887	253736	5583896
Lenga	14	Sur	917	252953	5584049
	2	Norte	1072	245847	5579452
	3	Norte	1236	245229	5578208
	6	Norte	1278	246228	5577904
	7	Sur	1249	253141	5586501
	8	Sur	1247	253723	5586817
Araucaria	9	Sur	1224	253460	5586434
	20	Norte	1000	254592	5627075
	21	Norte	1200	254657	5627624
	22	Sur	1200	255179	5628213

Las parcelas fueron ubicadas al interior del borde del rodal, para evitar una alteración de la vegetación por efectos externos e influencia de caminos, además alejadas de cursos de agua (distancia mayor a 50 m) y de pendientes fuertes. Se les demarcó sus 4 vértices con estacas de madera de 1,5 m, pintadas con pintura de color en su mitad superior y señalando el número del vértice. En cada parcela se estableció un área *buffer* de 10 m, quedando una parcela efectiva de levantamiento de 0,16 ha (40 x 40 m). En su interior se delimitó 3 subparcelas de 2 x 1 m, en el eje de mayor pendiente.

En cada parcela se registró, a nivel de especie, a todos los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) igual o superior a 10 cm y se les midió su altura total. El DAP se midió con cinta diamétrica y la altura con hipsómetro Vertex.

El levantamiento de datos se realizó en todas las parcelas en el año 2013, 2015, 2017, 2020 y 2023. La parcela 4 solo se levantó en el año 2013 y luego fue eliminada de la base de datos debido a una intervención mayor en el sitio. Todos los datos tomados en campo fueron digitalizados en una base de datos Excel.

Análisis de Datos

Para obtener grupos de especies arbóreas características de los rangos altitudinales del estudio (600, 800 y 1.000 msnm), se realizó un análisis de clasificación ascendente jerárquica mediante el paquete estadístico XLSTAT 2009. Este análisis se realizó con los datos de árboles con DAP igual o superior a 10 cm del primer levantamiento en el año 2013 para los tipos forestales Roble-Raulí-Coihue, Coihue-Raulí-Tepa y Lenga, separado por exposición norte y sur.

En el marco del análisis de vulnerabilidad se evaluó la exposición y sensibilidad al cambio climático en base a la metodología del IPCC (2007), adaptada para la iniciativa de investigación Climiforad (Delgado *et al.*, 2016). La exposición se evaluó mediante datos climáticos históricos y simulaciones sobre proyecciones futuras, determinándose en base a consultas a expertos, si el cambio producido en el clima se consideraba alto, medio o bajo (Delgado *et al.*, 2016). El análisis de sensibilidad se basa en las características de las especies arbóreas dominantes, considerando como tales a las que conforman más del 80% del área basal por parcela. Para esto, se clasificó a las especies dominantes en los tipos adquisitivo o conservativo (Díaz *et al.*, 2004) de acuerdo a sus rasgos funcionales: Masa de semillas, método de dispersión, altura máxima, densidad de madera y tasa de crecimiento. Las especies arbóreas de tipo funcional adquisitivo corresponden a especies pioneras, con semillas pequeñas dispersadas por el viento, con relativamente rápida tasa de crecimiento y capacidad de adquisición de recursos. Las del tipo funcional conservativo, por el contrario, son especies de crecimiento lento, que tienden a conservar recursos, sus semillas son grandes y se dispersan principalmente por aves y mamíferos medianos y grandes.

Se analizó también el rango de distribución de cada especie en el área de estudio, categorizándolas como especies de distribución restringida, mediana o amplia, de acuerdo a la variedad de tipos forestales en que se presentan. Una especie que se encuentra en un solo tipo forestal se consideró de distribución restringida; aquellas presentes en dos tipos forestales como de distribución intermedia; y a las presentes en tres o más tipos forestales se les consideró de distribución amplia. Mediante la combinación del tipo funcional y la distribución se estimó el nivel de sensibilidad de cada especie dominante a cambios en el clima.

La caracterización arbórea de las parcelas se realizó por tipo forestal para los años 2013 y 2023 en base al diámetro a la altura del pecho (DAP), altura dominante de los 16 árboles con mayor DAP por parcela (Hdom), el área basal por hectárea (AB) y número de árboles por hectárea (N). Los cálculos de los parámetros por parcela se realizaron con el software Excel y luego se calculó el promedio, desviación estándar, valor mínimo y máximo de cada parámetro por tipo forestal para los años 2013 y 2023 con el software estadístico Infostat. El cálculo de abundancia y riqueza de especies arbóreas se realizó con el software Excel por tipo forestal para los años 2013 y 2023.

RESULTADOS

Clasificación de Especies Arbóreas

Los resultados de la clasificación jerárquica de especies arbóreas por tipo de exposición se presentan en las Figuras 2 y 3.

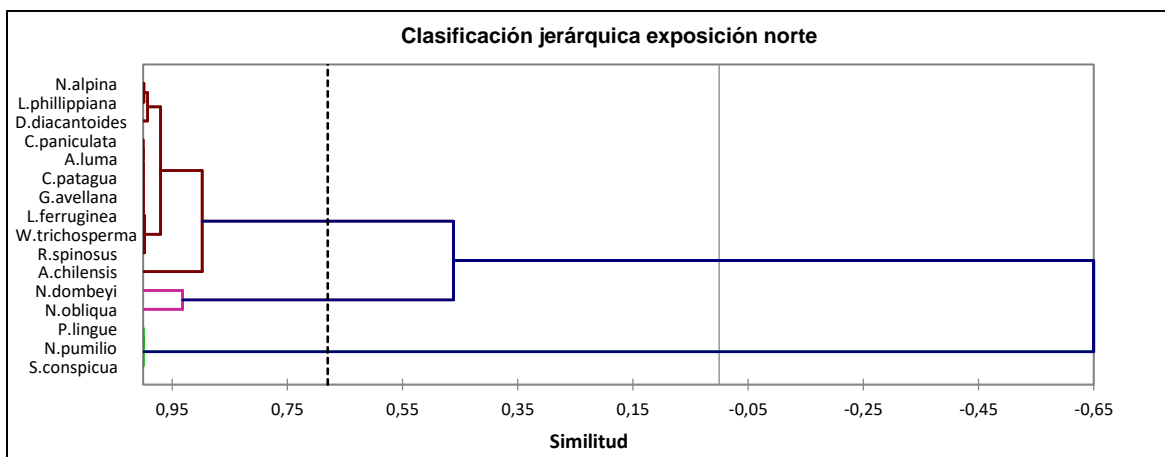


Figura 2: Clasificación jerárquica de especies arbóreas en parcelas con exposición norte.

Para la exposición norte la clasificación detecta 3 grupos de similitud: El grupo 1 con las especies *A. luma*, *A. chilensis*, *C. patagua*, *D. diacantoides*, *G. avellana*, *L. phillippiana*, *L. ferruginea*, *N. alpina*, *R. spinosus*, *W. trichosperma*; el grupo 2 con *N. obliqua* y *N. dombeyi*; y el grupo 3 con *N. pumilio*, *P. lingue* y *S. conspicua*.

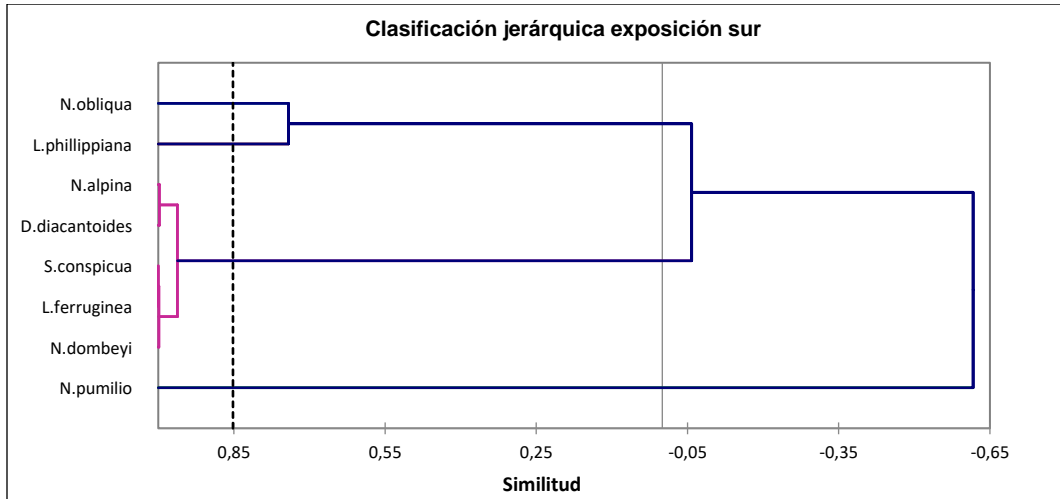


Figura 3: Clasificación jerárquica de especies arbóreas en parcelas con exposición sur

La clasificación jerárquica de las especies arbóreas en las parcelas con exposición sur también muestra la agrupación de especies en 3 clases: con *L. phillippiana* y *N. obliqua* en grupo 1; *D. diacantoides*, *L. ferruginea*, *N. alpina*, *S. conspicua* y *N. dombeyi* en el grupo 2; y *N. pumilio* en el grupo 3.

Vulnerabilidad de Especies Dominantes

Según la metodología aplicada para la definición de la vulnerabilidad, se identificaron las especies dominantes en cada una de las parcelas estudiadas. En Cuadro 3 se muestra el resultado por tipo forestal y exposición.

Cuadro 3: Especies dominantes que en conjunto acumulan el 80% del área basal en las parcelas estudiadas, según tipo forestal y exposición.

Tipo Forestal	Roble-Raulí-Coigüe		Coigüe-Raulí-Tepa		Lenga		Araucaria	
Exposición	Norte	Sur	Norte	Sur	Norte	Sur	Norte	Sur
Especies dominantes	<i>N. dombeyi</i>	<i>N. alpina</i>	<i>N. alpina</i>	<i>N. alpina</i>	<i>N. pumilio</i>	<i>N. pumilio</i>	<i>A. araucana</i>	<i>A. araucana</i>
	<i>N. obliqua</i>	<i>N. obliqua</i>	<i>N. dombeyi</i>	<i>N. dombeyi</i>	<i>N. dombeyi</i>	<i>N. dombeyi</i>	<i>N. dombeyi</i>	<i>N. dombeyi</i>
	<i>D. diacanthoides</i>	<i>L. phillippiana</i>	<i>L. phillippiana</i>	<i>L. phillippiana</i>	<i>S. conspicua</i>		<i>N. pumilio</i>	<i>N. pumilio</i>

Considerando las especies identificadas como dominantes (Cuadro 3), se evaluó la sensibilidad de los tipos forestales según los rasgos funcionales y la distribución de cada una de las especies. El resultado se resume en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Especies dominantes, sus rasgos funcionales y distribución como factores determinantes para la estimación de sensibilidad frente al cambio climático.

Especie	Tipo funcional	Rango altitudinal	Amplitud	Distribución	Sensibilidad
<i>Nothofagus obliqua</i>	adquisitiva	0-800	800	restringida	media
<i>Nothofagus alpina</i>	adquisitiva	200-1200	1000	intermedia	baja
<i>Nothofagus dombeyi</i>	adquisitiva	0-1000	1000	amplia	baja
<i>Nothofagus pumilio</i>	conservativa	600-1800	800	restringida	alta
<i>Dasyphyllum diacantoides</i>	adquisitiva	0-1000	1000	intermedia	baja
<i>Laurelia philippiana</i>	conservativa	0-700	700	intermedia	media
<i>Saxegothaea conspicua</i>	conservativa	500-1200	700	intermedia	media
<i>Araucaria araucana</i>	conservativa	800-2000	1200	restringida	alta

Según esta aproximación, las especies más sensibles al cambio climático serían lenga (*N. pumilio*) y araucaria (*A. araucana*). A esto se suma que en la comuna de Panguipulli ambas especies se encuentran en el límite altitudinal, donde el clima, junto a las condiciones edáficas, ya son una restricción al crecimiento. Esto significa un alto grado de exposición que junto a la alta sensibilidad condicionan en Panguipulli una alta vulnerabilidad de estas dos especies y del tipo forestal Lenga y Araucaria al cambio climático. Menos vulnerable sería el tipo forestal Coihue-Raulí-Tepa. Aquí raulí (*N. alpina*) y coihue (*N. dombeyi*) fueron categorizados con sensibilidad baja y solo tepa (*L. philippiana*) con una sensibilidad media, debido a su clasificación como especie conservativa. El tipo forestal Roble-Raulí-Coihue está representado en exposición norte solo por especies de sensibilidad baja.

Caracterización Arbórea

En el **Cuadro 5** se muestran los resultados de la caracterización arbórea por tipo forestal para el año 2013 y 2023 en términos de diámetro a la altura del pecho (DAP en centímetros), altura dominante (Hdom en metros), área basal (m²/ha) y número de árboles por hectárea (N/ha). Se muestran los valores promedios (mean), desviación estándar (SD) y valores mínimos (V_{min}) y máximos (V_{max}) por tipo forestal para los años 2013 y 2023 y la diferencia entre ambos periodos.

Cuadro 5: Caracterización arbórea por tipo forestal para el año 2013 y 2023.

Tipo Forestal	Año	DAP (cm)				Hdom (m)				AB (m ² /ha)				N° arb/ha			
		Mean	SD	V _{min}	V _{max}	Mean	SD	V _{min}	V _{max}	Mean	SD	V _{min}	V _{max}	Mean	SD	V _{min}	V _{max}
Araucaria	2013	37,6	27,7	10,0	195,2	28,8	11,6	16,5	56,0	97,7	22,3	80,3	122,9	571	429	244	1056
	2023	40,9	28,4	10,4	195,7	32,1	11,1	18,7	56,0	96,9	25,4	76,9	125,5	498	331	231	869
	Difer	3,3	0,7	0,4	0,5	3,3	-0,5	2,2	0,0	-0,8	3,1	-3,5	2,6	-73	-98	-13	-188
CoRaTe	2013	24,6	12,8	10,0	110,0	22,4	5,5	10,0	42,0	40,6	7,6	28,7	50,5	672	114	544	800
	2023	29,4	14,7	10,7	114,4	26,9	5,8	15,5	46,7	51,6	9,3	38,9	62,7	607	111	500	775
	Difer	4,9	1,8	0,7	4,4	4,5	0,3	5,5	4,7	11,0	1,7	10,2	12,1	-65	-3	-44	-25
Lenga	2013	39,5	26,0	10,1	168,0	23,7	6,2	8,0	35,0	61,6	18,1	46,5	95,1	352	204	194	669
	2023	41,8	25,6	10,6	168,2	24,5	5,7	11,9	35,5	59,5	17,1	49,1	93,5	316	194	175	619
	Difer	2,4	-0,4	0,5	0,2	0,8	-0,4	3,9	0,5	-2,1	-1,0	2,7	-1,6	-36	-10	-19	-50
RoRaCo	2013	31,3	20,8	10,0	220,0	25,5	6,5	4,5	37,0	49,3	14,9	32,1	69,8	448	160	263	681
	2023	34,9	23,9	10,3	243,0	29,1	6,4	16,1	40,1	55,1	20,5	32,0	84,5	393	180	231	663
	Difer	3,7	3,1	0,3	23,0	3,7	-0,1	11,6	3,1	5,8	5,6	-0,1	14,7	-55	20	-31	-19

En todos los tipos forestales los promedios del DAP y de la altura dominante muestran un aumento, mientras que el número de árboles disminuye. El área basal disminuye en los tipos forestales Araucaria y Lenga.

El tipo forestal Coihue-Raulí-Tepa presenta el mayor aumento de promedio de DAP, altura dominante y área basal, seguido por el tipo forestal Roble-Raulí-Coihue, mientras que el tipo forestal Lenga presenta los valores más bajos para los parámetros mencionados.

El número de árboles disminuyó en promedio para todos los tipos forestales, con una disminución mayor en el tipo forestal Araucaria, seguido por el tipo forestal Coihue-Raulí-Tepa, Roble-Raulí-Coihue y Lengua sucesivamente.

Comparando la distribución de especies del estrato arbóreo por tipo forestal entre 2013 y 2023, se observa en general una disminución de la abundancia por especie, mientras que la riqueza de especies se mantiene igual para todos los tipos forestales menos Lengua, donde la especie lingue (*P. lingue*) ya no está presente en 2023.

En el **Cuadro 6** se puede observar la distribución de especies del estrato arbóreo del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue en el año 2013 y 2023, respectivamente. La riqueza de especies se mantiene igual con 12 especies diferentes, siendo raulí (*N. alpina*), tepa (*L. phillippiana*) y coihue (*N. dombeyi*) las especies más frecuentes. En términos de abundancia, casi todas las especies muestran menos individuos en 2023, particularmente raulí (*N. alpina*) pasa de ser la especie con más individuos en 2013 a la segunda especie más abundante en 2023 después de tepa (*L. phillippiana*).

Cuadro 6. Distribución de especies del estrato arbóreo del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue en 2013 y 2023.

Especie	N° arb/ha	
	2013	2023
<i>Nothofagus alpina</i>	94	77
<i>Laurelia phillippiana</i>	79	77
<i>Nothofagus dombeyi</i>	66	64
<i>Dasyphyllum diacanthoides</i>	50	49
<i>Nothofagus obliqua</i>	109	78
<i>Raphithamnus spinosus</i>	15	15
<i>Weinmania trichosperma</i>	10	10
<i>Amomyrtus luma</i>	9	9
<i>Aristotelia chilensis</i>	6	4
<i>Crinodendron patagua</i>	3	3
<i>Gevuina avellana</i>	3	3
<i>Lomatia ferruginea</i>	3	3

En **Cuadro 7** se puede observar la distribución de especies del estrato arbóreo del tipo forestal Coihue-Raulí-Tepa en los años 2013 y 2023. La riqueza de especies se mantiene igual, con 6 especies diferentes, siendo las más frecuentes raulí (*N. alpina*), coihue (*N. dombeyi*) y tepa (*L. phillippiana*). Todas las especies muestran menos individuos en 2023 que en 2013, excepto fuinque (*L. ferruginea*) que permanece con un individuo.

Cuadro 7. Distribución de especies del estrato arbóreo del tipo forestal Coihue-Raulí-Tepa en 2013 y 2023.

Especie	N° arb/ha	
	2013	2023
<i>Nothofagus alpina</i>	352	323
<i>Nothofagus dombeyi</i>	208	173
<i>Laurelia phillippiana</i>	76	76
<i>Dasyphyllum diacanthoides</i>	28	25
<i>Saxegothaea conspicua</i>	6	6
<i>Lomatia ferruginea</i>	1	1

En el **Cuadro 8** se puede observar la distribución de especies del estrato arbóreo del tipo forestal Lenga en los años 2013 y 2023. Las especies presentes en este tipo forestal son lenga (*N. pumilio*), coihue (*N. dombeyi*), mañío de hojas cortas (*S. conspicua*) y lingue (*P. lingue*), sin embargo, el único individuo de lingue ya no está presente en el año 2023. En términos de abundancia por especie, se observan 44 y 3 individuos menos que en el año 2013 de lenga y de coihue, respectivamente.

Cuadro 8. Distribución de especies del estrato arbóreo del tipo forestal Lenga en 2013 y 2023.

Especie	N° arb/ha	
	2013	2023
<i>Nothofagus pumilio</i>	266	232
<i>Saxegothaea conspicua</i>	53	53
<i>Nothofagus dombeyi</i>	32	30
<i>Persea lingue</i>	1	0

En el **Cuadro 9** se puede observar la distribución de especies del estrato arbóreo del tipo forestal Araucaria en los años 2013 y 2023. Las tres especies presentes en el estrato arbóreo son coihue (*N. dombeyi*), araucaria (*A. araucana*) y lenga (*N. pumilio*). En términos de abundancia, las tres especies muestran menos individuos en 2023, siendo lenga la especie que más disminuye su abundancia relativa.

Cuadro 9. Distribución de especies del estrato arbóreo del tipo forestal Araucaria en 2013 y 2023.

Especie	N° arb/ha	
	2013	2023
<i>Nothofagus dombeyi</i>	427	363
<i>Araucaria araucana</i>	131	129
<i>Nothofagus pumilio</i>	13	6

DISCUSIÓN

Caracterización de Tipos Forestales

El análisis de clasificación jerárquica de especies arbóreas identificó tres tipos de bosques para la exposición norte y sur, los cuales corresponden en su composición de especies dominantes a los tipos forestales Roble-Raulí-Coihue (grupo 1, 600-800 msnm), Coihue-Raulí-Tepa (grupo 2, 800-1.000 msnm) y Lenga (grupo 3, sobre 1.000 msnm). Hay una disminución notoria de la diversidad de especies arbóreas asociadas a los tipos forestales de rangos altitudinales más elevados, lo que se puede explicar con las variables de temperatura, precipitación y de suelos de los diferentes rangos altitudinales. Dado que las especies dominantes representan los tipos forestales mencionados, se permite un primer análisis de desarrollo de las parcelas por tipo forestal.

Vulnerabilidad de Especies Dominantes

Cuando este estudio se inició en el año 2013, existía muy poca información sobre como las especies podrían reaccionar al cambio climático. A la fecha ya existen algunas publicaciones sobre la influencia de un clima más cálido y seco en el crecimiento de algunas especies. Para roble (*N. obliqua*), por ejemplo, [Urrutia & Rojas \(2020\)](#) encontraron que la precipitación influencia positivamente el crecimiento de roble a lo largo de toda su distribución en la Cordillera de Los Andes. La temperatura máxima por otra parte, tiene un efecto negativo en el crecimiento de los árboles en la mayor parte de los sitios. Sin embargo, se encontró que las sequías ocurridas hasta el año 2010 no han impactado fuertemente el crecimiento de roble en la Cordillera de Los Andes. Analizando en más detalles el comportamiento de roble frente a sequías, [Urrutia](#)

et al. (2021) concluyen que la tolerancia a este fenómeno estaría modulada por las condiciones locales, mostrando las poblaciones septentrionales/secas una tolerancia particularmente alta. Esta plasticidad coincide con la categorización de baja sensibilidad obtenida en este estudio sobre la base de la estrategia adquisitiva de la especie. Otras observaciones para las especies consideradas como vulnerables en este estudio las aportan Gibson-Carpintero *et al.* (2022), quienes proponen que el aumento de la temperatura al final del periodo vegetativo sería el principal factor limitante del crecimiento en el límite altitudinal en la Patagonia central desde mediados de la década de 1980, contrarrestando el esperado aumento del crecimiento arbóreo debido al calentamiento global. Esto se condice también con Rodríguez-Caton *et al.* (2016; 2019), quienes encontraron que los individuos de lenga (*N. pumilio*) en la vertiente oriental de los Andes fueron afectados por los episodios de sequía, especialmente los individuos de más edad. En relación al efecto del cambio climático en araucaria (*A. araucana*) se ha observado una fuerte asociación entre el patrón de crecimiento radial y la humedad superficial del suelo observada por satélite en el período 1979-2000, mostrando una alta sensibilidad de araucaria a este parámetro (Muñoz *et al.*, 2013).

Caracterización Arbórea

Las condiciones de bosque muestran tendencias claras de desarrollo y permiten agruparlos en dos grupos en base a los resultados obtenidos: (1) Los bosques de menor elevación (600-1.000 msnm), representados por el tipo forestal Roble-Raulí-Coihue y Coihue-Raulí-Tepa, que muestran un aumento en el promedio de DAP, altura dominante y área basal y una riqueza de especies arbóreas de 6 a 12 especies; y (2) los bosques de mayor elevación (sobre 1.000 msnm), representados por el tipo forestal Lenga y Araucaria, que revelan un menor aumento de promedio de DAP y altura dominante y una disminución del área basal y número de árboles, además de una reducida riqueza de especies arbóreas.

Los bosques de Roble-Raulí-Coihue y Coihue-Raulí-Tepa muestran promedios de área basal entre 40-55 m²/ha, parámetro comparable con el de rodales sin intervención silvícola, en contraste con rodales productivos con intervención silvícola que según estudios mantienen un área basal entre 15-40 m²/ha (Müller-Using, 2020). Los aumentos sostenidos en DAP, altura dominante y área basal, y la disminución de la densidad durante los últimos 10 años, demuestran que los rodales se encuentran en la fase de crecimiento, no encontrándose indicios de una afectación negativa del mismo. Esto se condice con la estimación inicial de una baja vulnerabilidad al cambio climático de las especies dominantes de estos tipos forestales. Sin embargo, se encontró una disminución en la abundancia de las especies roble (*N. obliqua*) y raulí (*N. alpina*) en los rodales de Roble-Raulí-Coihue y de coihue (*N. dombeyi*) y raulí (*N. alpina*) en Coihue-Raulí-Tepa, lo que podría indicar una extracción de árboles para uso maderero.

Los bosques de Lenga presentan un promedio de DAP de 39-41 cm, parámetro característico para rodales en fase madura (Silva, 2005), lo que sumado a su área basal entre 61-59 m²/ha, sugieren que los rodales se encuentran en la fase de crecimiento óptimo (Martin *et al.*, 2018). Sin embargo, llama la atención el escaso incremento en DAP (2,8 cm) y en altura dominante (0,8 m), además de una disminución del área basal y densidad de los rodales durante los diez años del periodo de estudio. Estas variaciones podrían ser indicios de un efecto negativo del cambio climático sobre el crecimiento de lenga (*N. pumilio*), situación que sería consistente con la estimación inicial de una alta vulnerabilidad de la especie, y con los resultados de otros estudios que relacionan el aumento de temperaturas y el déficit hídrico en el período de vegetación, con el crecimiento de la especie (Gibson-Carpintero *et al.*, 2022; Álvarez *et al.*, 2015; Rodríguez-Caton *et al.*, 2016, 2019).

Los bosques de Araucaria se caracterizan por un aumento del promedio de DAP y altura dominante, lo que sumado a la alta densidad de árboles por hectárea (1.056 en 2013 y 869 en 2023) permite concluir que los rodales se encuentran en la fase inicial de crecimiento óptimo (Drake *et al.*, 2005). El aumento de la densidad relativa de araucaria (*A. araucana*) y la disminución de la participación de las especies coihue (*N. dombeyi*) y lenga (*N. pumilio*) también comprueban que los rodales de Araucaria se encuentran en fase de crecimiento. Por ende, no se encontró indicios de una afectación negativa del crecimiento de araucaria (*A. araucana*), lo que se contradice con la estimación inicial de una alta vulnerabilidad de la especie frente al cambio climático.

CONCLUSIONES

La vulnerabilidad estimada en un inicio del periodo del presente estudio fue baja para los tipos forestales Roble-Raulí-Coihue y Coihue-Raulí-Tepa y alta para los tipos forestales Lengua y Araucaria, que en esta localización forman el límite altitudinal.

En los diez años de observación la distribución de especies arbóreas no demuestra cambios de especies entre los rangos de elevación o tipos forestales a lo largo del transecto altitudinal.

Para poder evaluar el comportamiento específico de las especies frente al cambio climático es necesario, en un segundo paso, realizar un análisis detallado del crecimiento a nivel de las especies dominantes identificadas por el presente estudio. Además, un análisis de la regeneración natural, así como indicadores de biodiversidad de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas pueden entregar antecedentes para una detección temprana de cambios en la estructura y distribución de especies a lo largo del gradiente altitudinal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al financiamiento del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), mediante el proyecto Climiforad, y el financiamiento permanente del Ministerio de Agricultura de Chile. Agradecemos el apoyo de la Fundación Huilo-Huilo, Forestal Neltume Carranco S.A. y Parque Nacional Villarrica por permitir el monitoreo de las parcelas en el marco del presente estudio.

REFERENCIAS

- Álvarez, C., Veblen, T.T., Christie, D.A., González-Reyes, A. (2015). Relationships between climate variability and radial growth of *Nothofagus pumilio* near altitudinal treeline in the Andes of northern Patagonia, Chile. *Forest Ecology and Management*, N°342. Pp: 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.01.018>
- ARCLIM (Atlas de Riesgos Climáticos para Chile). (2020). Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente. Santiago, Chile. Disponible en: <https://arclim.mma.gob.cl/amenazas/>
- Bahamóndez, C., Buchner, C., Muller-Using, S., Rojas, Y., Schlegel, B., Vergara, G. (2021). Vulnerabilidad al Cambio Climático del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue de la Región de Los Ríos. Chile. Informe Técnico N° 249. Instituto Forestal, Chile.
- Bahamóndez, C., Buchner, C., Muller-Using, S., Rojas, Y., Schlegel, B., Vergara, G. (2022). Vulnerabilidad al Cambio Climático del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue de la Región del Ñuble. Chile. Informe Técnico N° 257. Instituto Forestal, Chile.
- Bahamóndez, C., Buchner, C., Muller-Using, S., Rojas, Y., Schlegel, B., Vergara, G. (2023). Vulnerabilidad al Cambio Climático del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue de la Región de Los Lagos. Chile. Informe Técnico N° 264. Instituto Forestal, Chile.
- Beinroth, F.H., Luzzo, W., Maldonado, F. & Eswaran, H. (1985). Proceedings of the Sixth International Soil Classification Workshop, Chile and Ecuador. Part II: Tour guide for Chile. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Santiago, Chile.
- CEPF (The Critical Ecosystem Partnership Fund). (2019). A Lifeline for Biodiversity. The Critical Ecosystem Partnership Fund. Arlington, EE.UU. En: <https://www.cepf.net/sites/default/files/cepf-lifeline-for-biodiversity.pdf>
- Chakraborty, A. (2019). Mountains as vulnerable places: a global synthesis of changing mountain systems in the Anthropocene. *Geo Journal*, 86(2): 585–604. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10079-1>
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). (2014). Catastro de Recursos Vegetacionales de Chile, Región de Los Ríos. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile.
- Delgado, D., Finegan, B., Martín, M., Acosta, M., Carrillo, F., Hernández, T., Bejarano, L. et al. (2016). Análisis de la vulnerabilidad al cambio climático de bosques de montaña en Latinoamérica: un punto de partida para su

- gestión adaptativa. Informe técnico N° 406. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica.
- Diaz, S., Hodgson, J.G., Thompson, K., Cabido, M., Cornelissen, J.H.C., Jalili, A., Montserrat-Marti, G. et al. (2004).** The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science*, 15, 295-304. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2004.tb02266.x>
- Drake, A.F., Herrera, M.G. & Acuña, C.E. (2005).** Propuesta de manejo sustentable de *Araucaria araucana* (Mol. C. Koch). *Bosque (Valdivia)*, 26 (1): 23-32. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002005000100003>
- Freeman, B.G., Song, Y., Feeley, K.J. & Zhu, K. (2021).** Montane species track rising temperatures better in the tropics than in the temperate zone. *Ecology Letters*, 24(8): 1697-1708. <https://doi.org/10.1111/ele.13762>
- Gibson-Carpintero, S., Venegas-González, A., Urra, V.D., Estay, S.A. & Gutiérrez, A. (2022).** Recent increase in autumn temperature has stabilized tree growth in forests near the tree lines in Chilean Patagonia. *Ecosphere*, 13 (10), e4266. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4266>
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). (2017).** Censo de población y vivienda. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago, Chile.
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). (2007).** Cambio Climático 2007 – Base de ciencia física. Contribución del grupo de trabajo I al cuarto Informe de Evaluación del IPCC 2007. Londres, Cambridge University Press.
- Körner, C. (2007).** The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecological Evolution*, 22(11): 569–574. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.09.006>
- Martin, M., Pilquinao, B., Müller-Using, S., Bahamondez, C., Guíñez, R., Acuña, B., Bava, J. & Loguercio, G. (2018).** Diagramas de Manejo de Densidad para Bosques de Lengua de Aysén y Magallanes con Fines de Producción de Madera. Informe Técnico N° 219. Instituto Forestal, Chile.
- Müller-Using, S. (Ed). 2020.** El Manejo de Renovales de Roble-Raulí-Coihue en una Resumida Mirada: Estadísticas e investigaciones en curso. Informe Técnico. Instituto Forestal, Chile.
- Muñoz, A., Barichivich, J., Christie, D.A., Dorigo, W., Sauchyn, D., González-Reyes, A., Villalba, R. et al. (2013).** Patterns and drivers of *Araucaria araucana* forest growth along a biophysical gradient in the northern Patagonian Andes: Linking tree rings with satellite observations of soil moisture. *Austral Ecology*, 39(2): 1-12. <https://doi.org/10.1111/aec.12054>
- Pepin, N., Bradley, R.S., Diaz, H.F., Baraer, M., Caceres, E.B., Forsythe, N., Fowler, H. et al. (2015).** Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5(5): 424-430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>
- Rahbek, C., Borregaard, M.K., Colwell, R.K., Dalsgaard, B., Holt, B.G., Morueta-Holme, N., David Nogués-Bravo, D. et al. (2019).** Humboldt's enigma: What causes global patterns of mountain biodiversity? *Science*, 365 (6458), 1108–1113. <https://doi.org/10.1126/science.aax0149>
- Rodríguez-Caton, M., Villalba, R., Srur, A. & Williams, A.P. (2019).** Radial Growth Patterns Associated with Tree Mortality in *Nothofagus pumilio* Forest. *Forests*, 10: 489. <https://doi.org/10.3390/f10060489>
- Rodríguez-Caton, M., Villalba, R., Morales, M. & Srur, A. (2016).** Influence of Droughts on *Nothofagus pumilio* Forest Decline across Northern Patagonia, Argentina. *Ecosphere*, 7, e01390. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1390>
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandón, M. & Meseguer-Ruiz, O. (2017).** Climatic regionalization of continental Chile. *Journal of Maps*, 13(2), 66-73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- Silva, C. (2005).** Evolución de las existencias y desarrollo de la regeneración en bosques de lengua (*Nothofagus pumilio*) después de la corta de regeneración. Memoria Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Thakur, S., Negi, V. S., Dhyani, R., Satish, K. V., & Bhatt, I. D. (2021).** Vulnerability assessments of mountain forest ecosystems: A global synthesis. *Trees, Forests and People*, 6, 100156. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2021.100156>
- Urrutia-Jalabert, R., & Rojas Ponce, Y. (2020).** Influencia del clima sobre crecimiento de Roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) y resiliencia de la especie frente a las sequías en el centro-sur de Chile. Informe técnico N°232. Instituto Forestal, Chile.
- Urrutia-Jalabert, R., Barichivich, J., Rozas, V., Lara, A., Rojas, Y., Bahamondez, C., Rojas-Badilla, M. et al. (2021).** Climate response and drought resilience of *Nothofagus obliqua* secondary forests across a latitudinal gradient

in south-central Chile. Forest Ecology and Management, 485, 118962.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118962>