



ARTÍCULO

Migración Asistida de *Araucaria araucana* (Molina). K. Koch. Un Modelo para Salvaguardar el Potencial Adaptativo de una Especie Emblemática de los Bosques de Chile.

Roberto Ipinza Carmona^{1*}; Jorge González Campos²; María Paz Molina Brand²; Braulio Gutiérrez Caro²; Hernán Soto Guevara²; Laura Koch Zúñiga²; Rodrigo Hasbún Zaror³; Fernando Santibáñez Quezada⁴; Lilian Saavedra Paillao⁴; Carlos Magni Díaz⁴; Juan Celhay Schoelermann⁵ y Santiago Barros Asenjo⁶

¹Instituto Forestal, sede Los Ríos, Chile;

²Instituto Forestal, sede Biobío, Chile;

³Universidad de Concepción, Chile;

⁴Universidad de Chile, Santiago, Chile;

⁵CMPC, Los Ángeles, Chile;

⁶Instituto Forestal, Gerencia I&D. Santiago, Chile.

*Autor para correspondencia: roberto.ipinza@infor.cl

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2024.605>

Recibido: 25.02.2024; Aceptado 23.3.2024

RESUMEN

La *Araucaria araucana*, una especie emblemática de los bosques de Chile y Argentina, enfrenta una fuerte presión debido al cambio climático, lo que la ha predispuesto al daño foliar de la araucaria (DFA). Esta enfermedad afecta al 85% de las poblaciones chilenas y ha llevado a cambiar su estado de conservación a "en peligro de extinción" en la Cordillera de la Costa. Para conservar esta especie, se inició un programa de migración asistida, recolectando semillas de 458 individuos representativos de sus poblaciones en las Cordilleras de la Costa y Los Andes. Las semillas fueron cultivadas manteniendo la identificación familiar y se estableció una colección de plantas en 54 hectáreas distribuidas en seis unidades de conservación. Estas unidades, estructuradas como ensayos de progenie y procedencia, se instalaron en áreas de acogida tanto dentro como fuera de la distribución natural de la araucaria. Las áreas de acogida fueron seleccionadas mediante proyecciones climáticas para los próximos 50 y 70 años, garantizando condiciones idóneas para el desarrollo de la araucaria y minimizando el estrés bioclimático, que incluye estrés térmico por temperaturas extremas y estrés hídrico estival. El objetivo del programa de migración es salvaguardar el potencial evolutivo de la araucaria y establecer poblaciones base para futuras iniciativas de restauración utilizando el material genético rescatado.

Palabras clave: Cambio climático, ensayos de progenie-procedencia, genómica, presión de selección, variación genética adaptativa

SUMMARY

The *Araucaria araucana*, an emblematic species of the forests of Chile and Argentina, is facing significant pressure due to climate change, which has predisposed it to Araucaria foliar damage (AFD). This disease affects 85% of Chilean populations and has led to a change in its conservation status to "endangered" in the Coastal Range. To conserve this species, an assisted migration program was initiated, collecting seeds from 458 representative individuals from populations in the Coastal and Andes Ranges. The seeds were cultivated while maintaining family identification and resulted in a collection of plants established over 54 hectares across six conservation units. These units, structured as progeny and provenance trials, were installed in reception areas both within and outside the natural distribution of Araucaria.

The reception areas were selected based on climate projections for the next 50 and 70 years, ensuring ideal conditions for the development of Araucaria and minimizing bioclimatic stress, which includes thermal stress from extreme temperatures and summer water stress. The goal of the migration program is to safeguard the evolutionary potential of Araucaria and establish base populations for future restoration initiatives using the rescued genetic material.

Key words: Climate change, progeny and provenance trials, genomics, selection pressure, adaptive genetic variation

INTRODUCCIÓN

El artículo 1 de la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, define al cambio climático como “el cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”. La CMCC diferencia así entre el cambio climático atribuible a fenómenos naturales y el que es alterado por las actividades humanas (IPCC, 2014).

Existe un temprano consenso científico sobre el papel del clima en la dirección de los patrones de distribución espacial y productividad de las plantas (Woodward, 1987). Las variables climáticas se relacionan con los rangos geográficos y ecológicos de distribución de las plantas, de acuerdo a las restricciones fisiológicas que estas presentan y determinan la supervivencia y productividad de sus poblaciones en un determinado lugar (Villagrán & Hinojosa 1997; Harrison *et al.*, 2020). Sin embargo, lo alarmante es la tasa de cambios del clima durante las últimas décadas, que ha sido muy superior al ritmo de los siglos anteriores. Una variable clave, como la temperatura media global, ha presentado un aumento superior a 1°C durante el último siglo (IPCC, 2014). Los modelos de cambio climático global sugieren que la temperatura subiría en el orden de 2°C en la zona sur, incluso algo más en zonas montañosas de altura. Un cambio de esta magnitud puede ser bioclimáticamente significativo para muchas especies, considerando que en los últimos 10.000 años la temperatura no ha variado más que algunas décimas de grado. Se suma a este cambio, una modificación del régimen de lluvia, que está haciendo más secos y prolongados los veranos, lo que puede generar un efecto potenciador entre el estrés térmico e hídrico a que estarían quedando sometidas las especies (Harrison *et al.*, 2020).

Si la tasa de cambios en el clima excede el ritmo de respuesta fisiológica de las especies, en especial la capacidad de las poblaciones de migrar o adaptarse, se puede esperar un profundo impacto adverso en la distribución de las especies, tanto la composición y estructuras de comunidades y como en los procesos y funciones ecosistémicas asociados a estas especies (Ackerly *et al.*, 2010).

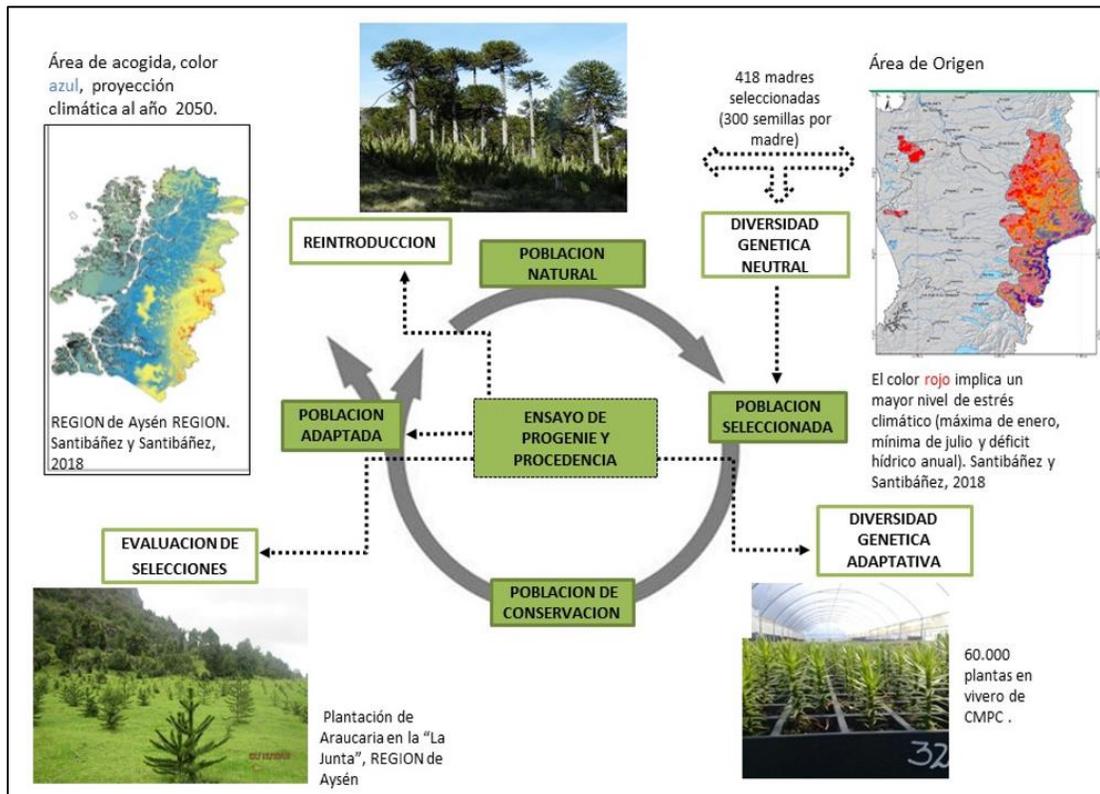
En el caso particular de Chile, se prevén cambios significativos en las décadas que vienen. El alza que ha venido teniendo la temperatura parece haberse acelerado a partir de los años 80 y, particularmente, a partir de los años 2000 (<https://www.cr2.cl/>). La velocidad de estos cambios es muy superior a la velocidad con que las especies pueden reaccionar para generar una respuesta evolutiva en el corto plazo a estas nuevas condiciones bioclimáticas sin precedentes.

El cambio climático está afectando a muchas especies forestales en Chile, destacándose el caso de *Araucaria araucana*, donde a partir del año 2015 profesionales de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) comenzaron a detectar muerte de ramas y presencia de canchales en ramas y tallos, con abundante exudación de resina, que afectaban incluso a ejemplares completos de todas las edades, en el 90% de las poblaciones naturales de la especie (Balocchi *et al.*, 2021). Tal fenómeno se denominó Daño Foliar de la Araucaria (DFA).

Como una respuesta inmediata al DFA se articuló una mesa técnica compuesta por doce organismos públicos, privados y académicos para aunar esfuerzos de investigación en torno a la sintomatología que afectaba a esta icónica especie de bosque nativo de Chile. Dentro del abanico de iniciativas que surgieron en dicha mesa técnica, y precisamente atendiendo a la posibilidad de sufrir una pérdida irreparable del acervo genético de la especie, debido a la mortalidad generada por el DFA, el Instituto Forestal (INFOR) determinó como prioritario iniciar acciones de conservación genética. Esto se concretó a través de un proyecto apoyado por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) financiando el proyecto Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales (SIMEF), apoyado también por CMPC, y se determinó aplicar el concepto de Migración Asistida.

La estrategia de Migración Asistida de *Araucaria*, establecida operacionalmente por Ipinza (2018), pretende salvaguardar el potencial evolutivo de la especie ante la presión del cambio climático. Se basa en una colección de germoplasma que captura la máxima diversidad genética de la especie y que posteriormente se establece en ensayos de progenies y procedencias, localizados dentro y fuera del área de distribución natural de la especie en Chile. De esta forma, la variación genética adaptativa de variables tales como la

supervivencia y rasgos de crecimiento, entre otras, se debieran expresar y permitirán seleccionar y utilizar el germoplasma de las araucarias sobreviviente de estos ensayos para restaurar y/o rehabilitar áreas afectadas por el cambio climático. Esta iniciativa tiene un doble objetivo, por una parte, rescatar material genético que pudiera perderse debido al efecto del DFA u otras enfermedades en la distribución natural de la especie y, por otra, establecer las bases de una población que permita efectuar en el futuro iniciativas de restauración con el material genético rescatado (**Figura 1**).



(Fuente: Ipinza, 2018)

Figura 1. Modelo de migración asistida de *Araucaria araucana*.

Como la mayoría de las especies leñosas, la *araucaria* tiene una capacidad de dispersión relativamente limitada y la presión del cambio climático sobrepasa esa capacidad. En consecuencia, no es sorprendente que la idea de migración asistida aparezca como una solución lógica y eficaz al problema de la adaptación, o más propiamente de la falta de adaptación, de los árboles ante el cambio climático (Aitken *et al.*, 2008).

Adicionalmente, durante 2018-2019, no habiendo certeza aún de las causas del DFA, ni de herramientas de prevención y menos aún de control, la Migración Asistida fue utilizada como un principio precautorio preciso para la conservación de esta significativa especie, no solo a nivel nacional, sino mundial (Ipinza, 2018).

En el presente documento se describe el plan o procedimiento operativo para la Migración Asistida de *Araucaria araucana*, siendo una de las primeras iniciativas de conservación *ex situ* de un recurso genético forestal a gran escala en Chile. Su objetivo es salvaguardar el potencial adaptativo de *Araucaria araucana*, ante la presión de selección del cambio climático mediante la aplicación de la estrategia de conservación conocida como Migración Asistida.

MATERIAL Y MÉTODO

Estudio Bioclimático

Para establecer el perfil bioclimático de la especie se sobrepuso su distribución geográfica (según el catastro de vegetación nativa de Chile) sobre una malla climática constituida por puntos de 1 km², en un Sistema de Información Geográfico (SIG). Cada uno de los puntos de esta malla se vincula a una base de datos donde se encuentra el valor de las variables climáticas calidez del verano (temperatura máxima del mes más cálido, enero), rigor del invierno (temperatura mínima del mes más frío, julio) y grado de aridez (déficit hídrico anual). Esto se proyecta de acuerdo con estándares del IPCC, y se conforma un índice de estrés integral para el 2050 y 2070 (Santibáñez & Santibáñez, 2018).

A partir de la superposición de la distribución geográfica y la malla climática se construyó un histograma de frecuencias de la presencia de la especie frente a intervalos de las variables climáticas. El supuesto básico es que la frecuencia más alta ocurre en los sectores donde la variable climática es más favorable, lo que implica menores niveles de estrés. Contrariamente, el intervalo máximo de distribución queda definido por las presencias de las especies en los menores y mayores valores de la variable analizada. Se supone que no hay individuos viviendo fuera de este intervalo máximo. Este análisis se repite para cada una de las variables climáticas, de modo que se obtienen 3 histogramas independientes, los que delimitan los rangos bioclimáticos tolerados por la especie (Santibáñez & Santibáñez, 2018).

Muestreo con Consideraciones Genéticas

En forma preliminar se utilizó como base la estructura genética reportada por Martín *et al.* (2014) quienes, utilizando 271 árboles desde 12 poblaciones naturales y aplicando 8 marcadores genéticos tipo microsatélites (SSR) e inferencia bayesiana, obtuvieron una estructura compuesta por cinco estratos genéticos, dos de ellos en la distribución costera y los otros tres en la distribución andina.

En la temporada verano-otoño del año 2018 se colectó aproximadamente 200 semillas por árbol, de un total de 418 árboles madre de *Araucaria araucana*, a partir de 12 poblaciones naturales representativas de los 5 estratos indicados. En verano de 2019 se realizó un enriquecimiento del muestreo de las poblaciones costeras, ocasión en que se colectó otras 200 semillas por árbol, para 40 árboles adicionales de la Cordillera de Nahuelbuta, por cuanto los resultados del estudio bioclimatológico sostienen que los mayores niveles de estrés estarían afectando precisamente a las poblaciones situadas en esa zona costera. En efecto, de acuerdo a antecedentes citados por Molina *et al.* (2021) los registros climatológicos indicarían que estas poblaciones son las que han soportado la mayor alza en la temperatura y/o variación en la pluviometría en los últimos 100 años.

Evaluación de Parámetros Morfológicos de Semillas y Plantas

Las semillas colectadas fueron trasladadas al Laboratorio de Semillas Forestales de la sede Biobío del Instituto Forestal, donde fueron almacenadas en cámara de frío a 4°C hasta su análisis. Se les midió parámetros morfológicos y fisiológico (González & Koch, 2021). Utilizando un pie de metro digital, se registró los valores promedio de 10 semillas por familia de largo (LS) y ancho, para esta última variable, dada la forma oblonga a cuneiforme, se consideró el ancho medio (ASM) y ancho base de la semilla (ASB).

Se registró también el peso individual (PS) y el número de semillas por kilo. Una vez sembradas en vivero, se evaluó la emergencia de plántulas y su supervivencia, así como parámetros morfológicos (altura y arquitectura de la planta), utilizando 10 individuos de cada familia de la colección (Saavedra, 2021).

Evaluación de Diversidad Genética Neutral

Se estimó la diversidad genética neutral de la colección muestreada, utilizando una muestra de 89 individuos, seleccionados según la distancia geográfica de las madres en terreno, a fin de minimizar el parentesco se utilizó un criterio del vecino más lejano dentro de cada población. Se emplearon marcadores moleculares del tipo Polimorfismo de Nucleótido Único (SNP), utilizando un genotipado por secuenciación

(Elshire *et al.*, 2011). Este estudio se realizó en el Laboratorio de Epigenética Vegetal, de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, en Chile. La secuenciación se realizó en el Centro de Biotecnología de la Universidad de Wisconsin, Madison, Estados Unidos.

Se calculó la diversidad genética usando los índices de Heterocigocidad (H_e) y Coeficiente de Endogamia (GIS), un Análisis de Varianza Molecular (AMOVA) usando un modelo de alelos infinitos basados en F_{ST} (Índice de fijación, medida de la diferenciación de la población debido a la estructura genética), significancia estimada a partir de 499 permutaciones, y análisis de agrupamiento para estimar el número de clúster genéticos para las progenies de poblaciones de *Araucaria araucana*. Este análisis se realizó a través de dos métodos a) Análisis Discriminante de Componentes Principales (ADCP) y b) agrupamiento *K-means*, el cual usa un criterio de información bayesiano (BIC, calculado usando la suma de cuadrados en lugar de verosimilitudes).

Viverización

La siembra de la colección de semillas y la producción de plantas se realizó en el vivero Carlos Douglas, de la empresa Forestal Mininco (CMPC), localizado en la ciudad de Yumbel, Región del Biobío, Chile.

La siembra se realizó en contenedores de 110 centímetros cúbicos de capacidad con corteza de pino compostada como sustrato, utilizando los esquemas operacionales de riego, fertilización y manejos culturales de las plantas del vivero. Durante la viverización se registró y analizó la emergencia de plántulas (Gutiérrez, 2019).

Establecimiento de Ensayos Genéticos en Lugares de Acogida y No Acogida

La selección de sitios para el establecimiento de ensayos se realizó considerando las áreas de acogida proyectadas en los mapas generados en el estudio bioclimatológico antes mencionado. Las áreas de acogida pueden estar dentro o fuera del área de distribución natural de *araucaria* y se caracterizan por presentar un mínimo nivel (0,0 - 0,2) de estrés integral (Santibáñez & Santibáñez, 2018).

En la selección de sitios para establecer los ensayos también se consideró, como elemento de comparación para determinar la interacción genotipo-ambiente, a algunas áreas con índice de estrés integral igual o superior a 21. Se realizaron visitas técnicas a cada sitio candidato, para revisar la superficie efectiva y factibilidad de instalación del ensayo, una vez aprobado, se procedió a marcar la superficie efectiva del sitio.

La mayoría de los ensayos se estableció con un diseño experimental de bloques incompletos, plantando un árbol por parcela (Single Tree Plot = STP). Este diseño permite evaluar muchas progenies o tratamientos, sin requerir bloques de gran tamaño y por lo mismo de mayor heterogeneidad, como ocurre al usar bloques completos. El diseño de bloques incompletos balanceados, permite una configuración donde todas las comparaciones de las progenies se presentan un mismo número de veces en un bloque.

Para cada ensayo genético, se realizó una habilitación de terreno, consistente en corta de arbustos menores y roce de vegetación indeseada. Posteriormente se confeccionó casillas de 40 cm de diámetro x 40 cm de profundidad a un espaciamiento normalmente de 5x5 m, utilizando una pala plantadora tipo neozelandesa. Las plantas fueron establecidas en las casillas con un orden pre asignado de acuerdo al croquis del diseño del ensayo.

Previo a la plantación, las raíces de las plantas fueron sumergidas en una solución fungicida (Ridomil Gold® (Syngenta), 460 mg/L), siguiendo el esquema para pino radiata propuesto por Reglinski *et al.* (2008). Al momento de plantar, cada planta fue fertilizada con 15 g de Basacote® granular de 9 M (Compo Expert). Adicionalmente, se suplementó con 30 g de Boronatro Calcita, para sustituir la baja proporción de Boro propia de los suelos costeros como la Cordillera de Nahuelbuta, este se aplicó post plantación, a 30 cm del cuello de cada planta.

Se planificó un programa de medición para los ensayos, contemplando una medición inicial al primer año

y luego, 2, 3 y 5 años sucesivamente, para estimar la interacción genotipo-ambiente de las variables supervivencia y altura inicial, que son caracteres de alto valor adaptativo, el procedimiento de análisis se realiza de acuerdo con las sugerencias de Gilmour *et al.* (1999).

RESULTADOS

Estudio Bioclimático

La proyección climática dentro y fuera del área de distribución natural de la especie indica que el sur de Chile, fuera del área de distribución de araucaria, dispondrá de numerosas áreas en altitud en la Cordillera de Los Andes, con índices mínimos de estrés integral, las cuales servirán como áreas de acogida para araucaria.

Estas áreas van bajando en altitud a medida que se avanza hacia el sur, de modo que, a partir de Chiloé continental, las posibles zonas de acogida han descendido hasta los 1.500 msnm. Más al sur, en la Región de Aysén esta tendencia descendente se mantiene, cayendo claramente por debajo de los 1.000 msnm. Esta región presenta fuertes gradientes climáticos longitudinales, estos gradientes expresan un grado creciente de continentalidad de un clima con fuertes rasgos marítimos hasta un sector oriental fuertemente continental. El análisis muestra que el sector intermedio del territorio, en la parte continental mantendría niveles aceptables de estrés, razón que permite mirar a estas zonas como posibles áreas de acogida.

Globalmente, en estas áreas las condiciones climáticas se mantendrían en rangos similares a lo que es en la actualidad el área de distribución de la *Araucaria araucana*.

Evaluación de Parámetros Morfológicos de Semillas y Plantas

La media, desviación estándar y coeficiente de variación de los parámetros morfológicos evaluados en las semillas y plantas se muestran en los **Cuadros 1 y 2**, respectivamente. Letras distintas indican diferencias significativas usando un $\alpha = 0.05$.

Evaluación Diversidad Genética Neutral

La diversidad genética de la colección total fue $H_o=0,15$. El coeficiente de endogamia. $G_{is}= 0,55$. Las poblaciones de la costa presentaron un $H_o=0,34$ y $G_{is}=0,58$, mientras que las poblaciones andinas presentaron un $H_o= 0,331$ y $G_{is}=0,54$.

El análisis de varianza molecular (AMOVA) indica que la varianza se divide en 65% dentro de los individuos, 21,5% entre individuos, 12,5% entre poblaciones, y 0,6% entre cordilleras. Los resultados del ADCP y análisis "K-means" indican que la colección de progenies de araucaria está dividida en 5 grupos genéticos; 2 grupos bien definidos en la distribución costa (uno en la población del Parque Nacional Nahuelbuta y el otro en Villa Las Araucarias), en tanto que las poblaciones andinas se estructuran en 3 grupos genéticos.

Cuadro 1. Resumen Análisis de Varianza (ANOVA) para parámetros morfológicos de las semillas de *Araucaria araucana*, se muestra la media \pm desviación estándar, las letras indican diferencias significativas utilizando el test de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se muestra μ (media poblacional) \pm desviación estándar poblacional y Coeficiente de variación (CV%).

Poblaciones	Largo de Semillas (cm)	Ancho Medio Semillas (mm)	Ancho Basal de Semillas (mm)	Peso de Semillas (g)	N° de Semillas por Kilo**
Villa Las Araucarias	3,61 \pm 0,29 c	1,24 \pm 0,08 c	1,35 \pm 0,12 abc	3,49 \pm 0,53 d	285
PN Nahuelbuta	4,11 \pm 0,36 a	1,33 \pm 0,10 a	1,36 \pm 0,11 ab	3,95 \pm 0,64 bc	256
RN Ralco	3,83 \pm 0,35 bc	1,22 \pm 0,11 c	1,30 \pm 0,13 cb	3,53 \pm 0,62 d	276
RN Las Nalcas	3,99 \pm 0,26 ab	1,26 \pm 0,08 bc	1,30 \pm 0,09 cde	4,21 \pm 0,68 ab	227
Lonquimay	3,60 \pm 0,41 c	1,24 \pm 0,08 bc	1,24 \pm 0,07 de	3,59 \pm 0,68 cd	292
RN Malalcahuello	3,80 \pm 0,40 bc	1,21 \pm 0,10 c	1,27 \pm 0,12 cde	3,60 \pm 0,72 cd	276
RN Huerquehue	3,94 \pm 0,19 ab	1,23 \pm 0,09 bc	1,24 \pm 0,07 de	4,06 \pm 0,54 abc	259
PN Conguillío	3,92 \pm 0,43 ab	1,25 \pm 0,11 bc	1,30 \pm 0,19 bcd	4,00 \pm 0,89 abc	261
PN Villarrica	4,08 \pm 0,40 a	1,30 \pm 0,09 ab	1,39 \pm 0,09 a	4,39 \pm 0,63 a	239
Cruzaco	3,76 \pm 0,17 bc	1,23 \pm 0,09 bc	1,21 \pm 0,07 e	3,83 \pm 0,63 bcd	254
Icalma	3,76 \pm 0,26 bc	1,26 \pm 0,08 abc	1,21 \pm 0,08 e	3,90 \pm 0,69 bcd	249
Marimenuco	3,75 \pm 0,36 bc	1,25 \pm 0,10 bc	1,21 \pm 0,09 de	3,82 \pm 0,45 bcd	274
$\mu \pm$ desviación estándar	3,90 \pm 0,36	1,26 \pm 0,10	1,29 \pm 0,12	3,87 \pm 0,71	Med: 257 *
CV (%)	9,36%	8,28%	9,31%	18,44%	26%

(*) Calculado sobre la mediana; (**) Test no paramétrico Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$).

Cuadro 2. Resumen Análisis de Varianza (ANOVA) para parámetros morfológicos de las plantas de *Araucaria araucana*, se muestra la media \pm desviación estándar, las letras indican diferencias significativas utilizando pruebas de comparaciones múltiples de medias Bonferroni ($\alpha = 0.05$).

Poblaciones	Altura total (cm)	Altura hasta el verticilo (cm)	Presencia de ramas (%)	Largo de rama (cm)	Largo total (cm)	Supervivencia (%)**
PN Nahuelbuta	14,8 \pm 0,3 abc	11 \pm 0,5 a	95 b	4,9 \pm 0,3 c	22,4 \pm 0,6 a	83,7 \pm 2,8 ab
Villas Las Araucarias	15,6 \pm 0,3 a	12,6 \pm 0,7 b	78 a	5,1 \pm 0,3 c	22,7 \pm 0,8 a	86,9 \pm 2,5 abc
RN Ralco	14,1 \pm 0,1 bcd	11,9 \pm 0,4 ab	31 abc	4,0 \pm 0,2 a	16,2 \pm 0,3 b	93,9 \pm 0,8 c
RN Las Nalcas	13,6 \pm 0,2 bd	11,7 \pm 0,5 ab	38 abc	4,5 \pm 0,2 ab	16,9 \pm 0,5 b	90,54 \pm 2,04 ac
Lonquimay	13,1 \pm 0,39 bcde	10,15 \pm 0,70 ab	10 ab	4,6 \pm 0,31 a	14 \pm 0,67 b	88,88 \pm 3,75 abc
RN Malalcahuello	13,85 \pm 0,22 bcd	11,9 \pm 0,53 ab	40 abc	4,2 \pm 0,26 ab	16,7 \pm 0,52 b	90,56 \pm 1,65 abc
PN Conguillío	13,81 \pm 0,26 bcd	11,8 \pm 0,53 ab	33 abc	4,1 \pm 0,20 a	16,1 \pm 0,45 b	90,48 \pm 1,41 abc
Marimenuco	13,22 \pm 0,36 bcde	10,07 \pm 1,16 a	70 abc	5 \pm 0,5b c	18,8 \pm 1,2 ab	88,02 \pm 3,75 abc
Cruzaco	14,98 \pm 0,35 ac	11,7 \pm 0,86 ab	44 abc	4 \pm 0,4 ab	17,6 \pm 0,6 b	87,90 \pm 2,77 abc
Icalma	13,24 \pm 0,18 d	10,6 \pm 0,54 a	42 abc	4,27 \pm 0,2 ab	16,5 \pm 0,4 b	88,18 \pm 1,92 ab
PN Huerquehue	13,19 \pm 0,23 de	10,8 \pm 0,61 a	40 abc	4,8 \pm 0,3 ab	16,8 \pm 0,6 b	91,27 \pm 1,44 abc
PN Villarrica	12,16 \pm 0,21 e	10,5 \pm 0,50 a	38 abc	4,3 \pm 0,2 ab	15,3 \pm 0,5 b	83,63 \pm 1,66 b
$\mu \pm$ desviación estándar	13,8 \pm 0,25	11,22 \pm 0,67	46,5	4,48 \pm 0,28	17,5 \pm 0,60	88,66 \pm 2,20

(**) Test no paramétrico Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$).

Evaluación de Parámetros Morfológicos de Semillas y Plantas

El Número de semilla por kilogramo muestra una distribución asimétrica negativa, por lo que el estadígrafo más apropiado para describir los datos en ese caso es la mediana, la cual es de 257. No cumplen los supuestos de Normalidad y Homocedasticidad, por lo que para esta variable se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, que reemplaza al ANOVA ($\alpha = 0,05$). Las poblaciones presentan diferencias significativas entre ellas ($P = 0.00 < \alpha = 0,05$).

El largo promedio de las semillas (LS) para todas las poblaciones muestreada durante el año 2018, fue de $3,9 \pm 0,36$ cm. El análisis de varianza utilizando las poblaciones como factor muestra que existen diferencias para esta variable, las 2 poblaciones costeras, Parque Nacional Nahuelbuta y Villa Las Araucarias,

presentan diferencias significativas entre ellas, las semillas de la Villa Las Araucarias son más pequeñas ($3,61 \pm 0,29$ cm) que las semillas de Parque Nacional Nahuelbuta ($4,19 \pm 0,36$ mm) (Cuadro 1). La variable LS de la población de la Reserva Nacional Ralco ($3,82 \pm 0,35$ cm) presenta diferencias significativas con respecto a la población de Parque Nacional Villarrica ($4,08 \pm 0,40$ cm), lo que se explica debido a que ambas poblaciones corresponden a los extremos norte y sur, respectivamente, de la distribución andina (Cuadro 1).

El ancho medio de las semillas para todas las poblaciones muestreada durante el año 2018, fue de $1,26 \pm 0,10$ cm. Se encontró diferencias para esta variable, las 2 poblaciones costeras presentan diferencias significativas entre ellas, las semillas de la Parque Nacional Nahuelbuta ($1,33 \pm 0,10$ cm), son más anchas que las semillas de Villa Las Araucarias ($1,24 \pm 0,08$ mm) (Cuadro 1). Resultados similares se observaron en el largo de la semilla, uno de los factores puede corresponder a la pérdida de diversidad genética. En las poblaciones andinas las diferencias significativas se exhiben en las poblaciones de los extremos de la distribución, la distribución sur, Parque Nacional Villarrica, presenta semillas levemente más anchas ($1,30 \pm 0,09$ cm) que las poblaciones más septentrionales Reserva Nacional Ralco ($1,22 \pm 0,11$ cm) y Reserva Nacional Malalcahuello ($1,21 \pm 0,10$ cm), manteniéndose la tendencia latitudinal (Cuadro 1).

Viverización

La emergencia promedio de plantas de la colección a los 7 meses post siembra, alcanzó a un 81,4% para las poblaciones andinas y 77,9% para poblaciones de la costa (Gutiérrez, 2019), lo que se traduce a 67.157 plantas de las cuales 60.158 corresponden a poblaciones andinas y 6.999 a las poblaciones costeras. La colecta de poblaciones costeras temporada 2019, genero un total de 5.341 plantas quedando un total de 12.340 plantas.

En el primer año de crecimiento (Cuadro 2) se puede ver como las plantas pertenecientes a la población localizada en el Parque Nacional Villarrica presentan el menor crecimiento en altura. Esto probablemente se deba al origen de esta población, la más austral de la distribución natural de la especie y cuyas condiciones climáticas, principalmente temperatura (mes cálido y frío), distan mucho del lugar de viverización, comuna Yumbel. Quizás esta sea la causa de la menor supervivencia (cantidad de plantas vigorosas/semillas germinadas/procedencias) de esta población.

Las poblaciones costeras, Parque Nacional Nahuelbuta y Villa Las Araucarias, presentan las alturas mayores, pero no existe una relación entre el tamaño de las semillas y la altura de planta, ya que las semillas más grandes corresponden a la población Parque Nacional Villarrica y sus plantas alcanzan menores altura.

Con relación a la arquitectura (Presencia de ramas, Largo de ramas y Largo total), existe una tendencia en las poblaciones costeras de presentar una mayor cantidad de ramas, en comparación a las poblaciones andinas, esto continúa siendo materia de investigación, aunque posiblemente es un carácter adaptativo.

Pese a que las poblaciones costeras presentaron rápido crecimiento, especialmente en el desarrollo de ramas y largo total, su supervivencia fue inferior en relación a las poblaciones andinas.

Establecimiento de Ensayos en Lugares de Acogida

A la fecha se han seleccionado 6 sitios tanto dentro del área de acogida, como fuera de esta (Cuadro 3).

Evaluación de Diversidad Genética Adaptativa

La medición del ensayo establecido en la Reserva Nacional de Coyhaique, a dos años de su plantación, permitió estimar la heredabilidad individual de la altura, como $h^2 = 0,50 \pm 0,13$ y de la supervivencia como $h^2 = 0,16 \pm 0,18$.

Cuadro 3. Sitios seleccionados para el establecimiento de ensayos genéticos dentro y fuera de las áreas de acogida.

Sitio Seleccionado	Propiedad	Superficie efectiva (ha)	Latitud grados	Longitud grados
Reserva Nacional Coyhaique	Pública	4,1	-45,51130	-71,98565
Predio Casa Blanca	Privada	1	-38,47411	-73,18093
Predio Caramávida	Privada	2,25	-37,65783	-73,24658
Reserva Nacional Malalcahuello	Pública	40	-38,39926	-71,59341
Predio San Antonio	Privada	1,6	-37,79468	-72,82972
Predio Santa Elena	Privada	4,3	-45,113125	-72,271811

DISCUSIÓN

Estudio Bioclimático

Existe solo un trabajo de predicción de áreas potenciales de distribución de araucaria, realizado por el Centro de Semillas, Genética y Entomología de CONAF en el año 2018, usando el método de Máxima Entropía (Phillips *et al.*, 2006). Los resultados de este estudio sostienen que la probabilidad futura de presencia de araucaria ocupará un área más allá de su distribución geográfica natural, principalmente en la Cordillera de Los Andes entre las regiones de Maule y Aysén. En Aysén se fortalece la probabilidad de presencia de araucaria en una mayor superficie (Espinoza, 2018), siendo resultados similares a los encontrados en el estudio bioclimatológico presentado en este trabajo.

Evaluación Diversidad Genética Neutral

La heterocigocidad es levemente menor en poblaciones costeras ($H_o = 0,14$) que en poblaciones andinas ($H_o = 0,15$), mientras que el índice GIS es mayor en poblaciones costeras ($GIS=0,58$) que en las andinas ($GIS=0,54$). Esta situación se podría correlacionar con el estado de amenaza en que se encuentran las poblaciones costeras. Para este estudio, el valor general de $GIS = 0,55$ da indicios sobre el cruzamiento histórico entre individuos. Las poblaciones andinas del centro de la distribución natural presentan menores valores de H_o , lo cual podría estar relacionado con la especialización de dichos individuos a un hábitat de mayor altura y por ende clima más frío.

El análisis jerárquico de diferenciación genómica dentro de individuos, entre individuos (dentro de las poblaciones), entre poblaciones (dentro de las cordilleras) y entre macrozona muestra que el mayor porcentaje de la variación está dentro de los individuos. No obstante, existe diferenciación significativa en los otros niveles jerárquicos.

Por otra parte, los resultados del ADCP y análisis “*K-means*” indican que la colección de progenies de araucaria está estructurada en 5 grupos genéticos compuesto por los individuos pertenecientes a las poblaciones costeras separados por el PC1, por otro lado, en el PC2 se encuentran las poblaciones andinas. Los resultados obtenidos respaldan la estructura genética reportada Martín *et al.* (2014).

Evaluación de Parámetros Morfológicos de Semillas y Plantas

En la literatura se reporta un número estimado de 260 semillas por kilo (Muñoz, 1984; Caro, 1995; González *et al.*, 2006). Troncoso (2015), informa un valor de $311 \pm 19,1$ semillas/kg (año 2013) y $406 \pm 12,0$ semillas/kg (año 2014), para la población de Villa Las Araucarias. En este estudio, para esta localidad, se obtuvo un valor $294 \pm 63,37$ semillas/kg.

En las poblaciones andinas el número de semillas por kilogramo varía de 180 a 250, siendo también un número mucho menor que en Villa Las Araucarias. La diferenciación en el tamaño de las semillas está correlacionada con numerosos factores ambientales, como la variación altitudinal (Bekessy *et al.*, 2002), la

que implica variaciones de temperatura, cantidad y tipo de precipitaciones (pluviales o nivales). Las diferencias ambientales podrían explicar las diferencias en el tamaño de las semillas de araucaria.

En relación al largo de semillas (LS), en los últimos años varios autores informan una disminución en la variabilidad genética para la especie en la población de Villa Las Araucarias. Los análisis utilizando marcadores moleculares tipo microsatélites (SSR) muestran que la población de Villa Las Araucarias presenta la menor variación genética con respecto al resto de las poblaciones de la especie, medida como heterocigosidad no sesgada ($U_{He} = 0,56$) (Martín *et al.*, 2014). Otros autores, utilizando marcadores tipo aloenzimas, señalan que Villa Las Araucarias tiene el menor número de alelos por locus polimórfico. Se puede teorizar que la falta de diversidad genética tendrá efectos en la expresión de rasgos morfológicos, sin embargo, se necesita profundizar estos análisis.

Se puede comparar los datos de la variable LS para la localidad Villa Las Araucarias; Troncoso (2015) determinó que las semillas colectadas en 2013 en esta localidad miden $3,84 \pm 0,28$ cm, en el presente estudio esta localidad presenta un valor de $3,61 \pm 0,29$ cm, siendo valores similares. Otros autores mencionan valores de 4 a 5 cm para el largo de las semillas a lo largo de su distribución natural (Donoso & Cabello, 1977; Donoso, 1998). Aun sin pruebas estadística, se puede teorizar que las semillas han disminuido su tamaño, sin embargo, para confirmar estas suposiciones se debe contar con información temporal sobre la variable.

El comportamiento de la variable LS en las distribuciones extremas sugiere una tendencia latitudinal en la variación, por lo menos en la macrozona Andes. Al respecto, Sersic *et al.* (2011), describen quiebres filogeográficos latitudinales para algunas especies de los géneros *Nothofagus* y *Austrocedrus*, lo que podría estar explicando estas diferencias en araucaria.

Troncoso (2015) informó un valor de $13,9 \pm 1,2$ mm de ancho medio de la semilla, para la localidad Villa Las Araucarias, en este estudio para esta localidad se reporta un valor de $12,43 \pm 0,83$ mm de ancho medio de la semilla. Al igual que con el largo de las semillas, el ancho también parece disminuir, aunque cabe destacar la baja diversidad genética de la localidad reportada.

Viverización

Una evaluación preliminar de emergencia de plántulas se realizó en octubre de 2018, es decir a 4 meses post siembra, alcanzando un valor medio de 58,9%. En esa ocasión se observó que en las procedencias costeras la germinación y la emergencia de plántulas (68,1 %) se manifiestan antes que en las procedencias andinas (57,8%). En la evaluación final, efectuada 7 meses post siembra, es decir en enero de 2019, se constató un aumento general de la emergencia de plántulas, que subió de 58,9 a 81,1%. Este incremento fue de mayor envergadura para las procedencias andinas, las cuales, a pesar de exhibir una germinación más lenta, alcanzaron valores de emergencia de plántulas superiores a los de las procedencias costeras. Considerando la evaluación de enero 2019, en promedio la emergencia de plantas de las 418 familias alcanzó un 81%, siendo mayor en las semillas de las procedencias andinas (81,4%) que en las procedencias costeras (77,9%) (Gutiérrez, 2019).

Establecimiento de Ensayos en Lugares de Acogida

Se han establecido 6 ensayos genéticos, de progenie y procedencias, todo de tamaños diferentes debido a la superficie efectiva, pero usando el mismo esquema operacional. Esta red de ensayos permitirá generar un resguardo del material vegetal y subyacentemente de la diversidad genética de la especie.

La reintroducción en poblaciones naturales de germoplasma resguardado en los ensayos genéticos se llevará a cabo cuando se verifiquen las correlaciones genéticas edad-edad, desempeño de las procedencias en las distintas áreas de ensayo, interacciones genotipo ambiente y puesta a punto de tecnología de embriogénesis somática, entre otros detalles.

CONCLUSIONES

Dentro del programa de migración asistida, el establecimiento de ensayos de progenie y procedencia de *Araucaria araucana*, tanto fuera como dentro de la distribución natural de esta especie, está permitiendo salvaguardar su potencial adaptativo, en especial las procedencias de las zonas costeras que se encuentran en peligro de extinción por la presión de selección que está ejerciendo el cambio climático.

El estudio bioclimático permitió identificar las zonas de máximo y mínimo estrés integral, denominándose esta última como área de acogida para la migración asistida de la *Araucaria araucana*.

El análisis molecular de *Araucaria araucana* reveló que la heterocigosidad de las procedencias costera es levemente menor a las andinas y la endogamia es mayor en las procedencias costeras que las andinas.

El Análisis Discriminante de Componentes Principales (ADCP) y el agrupamiento *K-means*, determinó la existencia de 5 agrupaciones ecológico genético de la *Araucaria* en la zona de estudio, dos costeras y tres andinas.

La procedencia costera de Villa Las Araucaria, presenta los menores tamaños de semilla y menores niveles de diversidad genética y es donde el efecto de la presión del cambio climático se está expresando con mayor intensidad.

RECONOCIMIENTOS

Se agradece a la Corporación Nacional Forestal de Chile, en especial a sus profesionales Aida Baldini, Mónica Gonzalez, Julio Figueroa, Nefalí Soto y Leonardo Araya. Al Instituto Forestal que a través del grupo de Conservación y de Mejora Genética prestó su apoyo técnico y a SIMEF por el apoyo financiero. Al Dr. Fernando Drake (QEDP) de la Universidad de Concepción, por su empuje y compromiso para aunar a muchas instituciones en la tarea de salvaguardar el potencial evolutivo de la *Araucaria araucana*. Al señor Eduardo Cayul, presidente de los Loncos de la comunidad de Lonquimay. A las empresas forestales APROBOSQUE, Bosques Arauco y, en especial, a CMPC, por su incondicional apoyo y compromiso en el proyecto de Migración Asistida. Igualmente, a todos los administradores y guardaparques del Sistema Nacional de Áreas Silvestre Protegidas del Estado con presencia de araucaria administrados por la Corporación Nacional Forestal.

REFERENCIAS

- Aitken, S., Yeaman, S., Holliday, J., Wang, T. & Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcome for tree population. *Evol. Appl.*, N° 1. Pp: 95-111. <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>
- Ackerly, D., Loarie, S., Cornwell, W., Weiss, S., Hamilton, H., Branciforte, R. & Kraft, N. (2010). The geography of climate change: implications for conservation biogeography. *Divers. Distrib.*, N° 16. pp: 476-487. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00654.x>
- Balocchi, F., Wingfield, M.J., Ahumada, R. & Barnes, I. (2021). *Pewenomyces kutranfy* gen. nov. et sp. nov. causal agent of an important canker disease on *Araucaria araucana* in Chile. *Plant Pathol.*, N° 70. Pp: 1243-1259. <https://doi.org/10.1111/ppa.13353>
- Bekessy, S., Allnutt, T., Premoli, A., Lara, A., Ennos, R. *et al.* (2002). Genetic variation in the vulnerable and endemic Monkey Puzzle tree, detected using RAPDs. *Heredity*, N° 88. Pp: 243-249. <https://doi.org/10.1038/sj.hdy.6800033>
- Caro, M. (1995). Producción y dispersión de semillas de *Araucaria araucana* (Mol.) C. Koch., en Lonquimay. Memoria para obtener el título de Título de Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago. 55 p.

- Donoso, C. & Cabello, A. (1977).** Antecedentes fenológicos y de germinación de especies leñosas chilenas. Revista de la Facultad de Ciencias Forestales, 1(2): 31-41.
- Donoso, C. (1998).** Bosques templados de Chile y Argentina, Variación, estructura y dinámica. Cuarta Edición. Editorial Universitaria. Santiago. 483 p.
- Elshire, R., Glaubitz, J., Sun, Q., Poland, J., Kawamoto, K. et al. (2011).** A Robust, Simple Genotyping-by-Sequencing (GBS) Approach for High Diversity Species. PLoS ONE, N° 6: e19379. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0019379>
- Espinoza, J. (2018).** Modelamiento del nicho ecológico y estimación del efecto del cambio climático en la distribución de especies. Centro de Semillas, Genética y Entomología, CONAF, Chillán, Chile.
- Gilmour, A., Cullis, B., Welham, S. & Thompson, R. (1999).** ASREML. Beta Version. 177 p.
- González, M., Cortés, M., Izquierdo, F., Gallo, L., Echeverría, C., Bekkesy, S. & Montaldo, P. (2006).** *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch Araucaria (ó), Pehuén, Piñonero, Pino Araucaria, Pino chileno, Pino del Neuquén, Monkey Puzzle Tree. En: Donoso, C. (Ed.) Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: Autoecología. Valdivia, Chile. Pp: 36-53.
- González, J. & Koch, L. (2021).** Evaluación de parámetros morfológicos y fisiológicos en semillas de *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch, Cosecha Temporada 2018. En: Ipinza, R. y Müller-Using, S. (Eds). Migración asistida de *Araucaria araucana*. FAO y MINAGRI. Santiago. Pp: 75-89.
- Gutiérrez, B. (2019).** Análisis de la emergencia de plántulas durante la viverización de una colección de semillas de 418 familias de *Araucaria araucana*. Ciencia & Investigación Forestal, 25(1): 21-38. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2019.508>
- Harrison, S., Spasojevic, M. & Li, D. (2020).** Climate and plant community diversity in space and time. PNAS, N° 117. Pp: 4464-4470. <https://doi.org/10.1073/pnas.1921724117>
- IPCC (2014).** Climate Change 2014. En: R.K. Pachauri, R. K. & Meyer, LA. (Eds). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC. Geneva, Switzerland. 151 p.
- Ipinza, R. (2018).** Migración Asistida: El nuevo paradigma de la conservación en recursos genéticos forestales para la adaptación al cambio climático. Ciencia & Investigación Forestal, 24(3): 69-88. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2018.504>
- Martín, M., Mattioni, C., Lusini, I., Molina, J., Cherubini, M. et al. (2014).** New insights into the genetic structure of *Araucaria araucana* forests based on molecular and historic evidences. Tree Genet. Genomes, N° 10. Pp: 839–851. <https://doi.org/10.1007/s11295-014-0725-1>
- Molina, M., González, J., Soto, H. & Barrientos, M. (2021).** Cosecha de semillas de *Araucaria araucana*. En: Ipinza, R. y Müller-Using, S. (Eds.). Migración asistida de *Araucaria araucana*. FAO y MINAGRI. Santiago. Pp: 27-52.
- Muñoz, R. (1984).** Análisis de la productividad de semillas de *Araucaria araucana* (Mol.) C. Koch, en el área de Lonquimay. Tesis para obtener el título de ingeniero forestal. Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. Universidad de Chile. Santiago. 84 p.
- Phillips, S., Anderson, R. & Schapire, R. (2006).** Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecol. Modell., N° 190. Pp: 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Reglinski, T., Spiers, T., Taylor, J., Ah Chee, A. & Dick, M. (2008).** Management of *Phytophthora* root rot in Radiata Pine seedlings. Plant Pathology, 58(4): 723-730. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2009.02021.x>
- Saavedra, L. (2021).** Análisis morfológico y genético de caracteres tempranos en plantas de *Araucaria araucana* (Molina). K. Koch, en un ensayo de progenie in vitro. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniera Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Departamento de Silvicultura y Conservación de la Naturaleza Universidad de Chile. Santiago. 65 p.

- Santibáñez, F. & Santibáñez, P. (2018).** Evaluación de las forzantes bioclimáticas en la sustentabilidad de las comunidades de araucarias en Chile. Hacia una estrategia de conservación del patrimonio natural frente a la amenaza del cambio climático. Informe Técnico INFODEP. Santiago.
- Sersic, A., Cosacov, A., Cocucci, A., Johnson, L., Pozner, R. et al. (2011).** Emerging phylogeographical patterns of plants and terrestrial vertebrates from Patagonia. Biol. J. Linn. Soc., N° 103. pp: 475-494. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8312.2011.01656.x>
- Troncoso, A. (2015).** Evaluación del proceso de germinación de la especie *Araucaria araucana* (Mol.) Koch. proveniente del sitio prioritario de conservación de Villa Las Araucarias, Región de La Araucanía. Memoria para optar al Título de Ingeniero en Conservación de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales. Universidad Austral de Chile. Valdivia. 40 p.
- Villagrán, C. & Hinojosa, L. (1997).** Historia de los bosques del sur de Sudamérica, II: Análisis fitogeográfico. Rev. Chil. Hist. Nat., N° 70. Pp: 241-267.
- Woodward, F. (1987).** Climate & Plant Distribution. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge University Press. UK. 174 p.