

Volumen 31 N° 2. Agosto, 2025.

ISSN 0718-4646



<https://revista.infor.cl>

CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL



**INSTITUTO FORESTAL
CHILE**





<https://revista.infor.cl>



REVISTA CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL.

INSTITUTO FORESTAL. CHILE.

La revista Ciencia & Investigación Forestal es una publicación científico técnica, en español, publicada por el Instituto Forestal desde el año 1987. Es una publicación de acceso abierto, seriada, arbitrada, en formato digital y de carácter interdisciplinario.

En la Revista se divulga la investigación y ciencia forestal con una visión aplicada y orientada principalmente a profesionales y técnicos del sector forestal que demandan soluciones para sus problemas en el corto y mediano plazo, así como a profesionales del sector público y privado, investigadores, académicos, personeros con responsabilidad en la toma de decisiones técnico-políticas, y en general a la sociedad interesada en el conocimiento de los múltiples bienes y servicios que proveen los ecosistemas forestales.

Ciencia & Investigación Forestal publica contribuciones originales e inéditas de investigadores y profesionales, de instituciones nacionales o extranjeras, interesados en publicar investigación aplicada en el ámbito de las ciencias forestales y materias afines en las temáticas económicas, sociales y ambientales.

Todas las contribuciones presentadas a la revista son sometidas a un proceso de revisión por pares (*peer review*) bajo la modalidad de doble ciego.

La periodicidad de publicación es de tres números por año y ocasionalmente números especiales.

La Revista provee acceso libre a su contenido bajo el principio de hacer disponible la investigación al público para fomentar un mayor intercambio de conocimiento global. No existe costo por acceso a las contribuciones publicadas y los autores no asumen ningún costo por el procesamiento, revisión, edición y publicación de sus contribuciones.

En el sitio Web de la Revista (<https://revista.infor.cl>) es posible acceder a todos los números publicados y también encontrar toda la información referente a Equipo Editorial, Propiedad Intelectual, Declaración de Privacidad, Tipo de Contribuciones y la Guía y Recomendaciones para Autores. Se trata de una plataforma OJS (*Open Journal System*) en la cual, además de la información indicada, radica el manejo del flujo editorial de la Revista. Los autores deben a través de esta plataforma incorporar sus contribuciones, recibir posibles sugerencias de correcciones y finalmente enterarse de la aceptación o eventual rechazo de estas.

Santiago Barros & Braulio Gutiérrez
Editores C&I Forestal
sbarros@infor.cl bgutierr@infor.cl



CONTENIDO

ARTÍCULOS

Sistema de Postcosecha de Piñón Mediterráneo (<i>Pinus pinea</i> L.) Producido en Chile. Ian Homer Bannister & Jorge Mac-Ginty Fontecilla.	5
Sistemas Agroforestales y Obras de Conservación de Suelo Potencian la Captura de Carbono en Ecosistemas Xerofíticos de Coquimbo. Marcelo Rosas Cerda; Jaime Montenegro Rojas & Sergio Silva Soto.	33
Regeneración de Especies de Interés Maderero en Hoyos de Luz en Bosques Nativos del Centro-Sur de Chile con Plantación Suplementaria de <i>Nothofagus obliqua</i>. Eduardo Molina Rademacher; Sabine Müller-Using Wenzke; Bastienne Schlegel Heldt & Andrés Fuentes Ramírez.	49
Evaluación de la Restauración Agroforestal y Calidad Ecológica de una Zona Ribereña en la Región de Aysén. Abraham Bustos Palominos; Jaime Salinas Sanhueza; Iván Moya Navarro & Bernardo Acuña Aroca.	63
Bienes y servicios de las formaciones xerofíticas: percepción, usos ancestrales y métodos de extracción en la Regiones de Coquimbo y Atacama. José Hernández Cartes, Sergio Silva Soto, Sandra Gacitúa Arias & Marlene González González.	75
APUNTES	
Resolución del Conflicto en el Sector Forestal Chileno: Una Propuesta desde la Teoría de Juegos – Abordando Resultados para una Solución Sostenible. Roberto Ipinza Carmona.	93
Criterios Prácticos para la Recolección y Almacenamiento de Semillas Forestales en Programas de Conservación, Restauración y Mejoramiento Genético. Braulio Gutiérrez Caro.	113

Publicado por Ciencia & Investigación Forestal bajo licencia CC-BY-NC 4.0



Las opiniones contenidas en esta revista son de exclusiva responsabilidad de los autores que las emiten y no representan necesariamente la posición institucional del Instituto Forestal.



ARTÍCULO

Sistema de postcosecha de Piñón Mediterráneo (*Pinus pinea* L.) producido en Chile.Ian Homer Bannister¹ ; Jorge Mac-Ginty Fontecilla¹ 

¹ Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Departamento de Ingeniería y Suelos. Santiago, Chile. ihomer@uchile.cl; jorgemacginty@uchile.cl.

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.621>

Recibido: 26.02.2025; Aceptado 04.04.2025.

RESUMEN

La producción de piñón mediterráneo proveniente de *Pinus pinea* L. se presenta como un sector dinámico con un futuro prometedor. La creciente demanda global de piñones como alimento saludable, junto con su alto valor en el mercado, impulsan el desarrollo de esta industria. En Chile no existen prestadores de servicios que se dediquen a los procesos vinculados con la postcosecha del piñón mediterráneo y, a la vez, hay una falta de información general para poder llevar a cabo estas labores o a tener acceso a replicar estas máquinas y sus procesos.

En este estudio se analizó y optimizó el procesamiento del piñón mediterráneo en un sistema de tres fases (partidora de piña, calibradora, partidora de piñones), identificando y corrigiendo los puntos críticos, de manera de minimizar las pérdidas en el proceso de desgranado de la piña, asegurar la correcta selección del fruto en tres calibres, los cuales permiten seleccionar un mercado objetivo y ayuda a evitar las partiduras del fruto en el proceso de partidura de piñones. También se caracterizó la morfología, propiedades físicas y comportamiento de la semilla frente a la humedad, información fundamental para los procesos de postcosecha, especialmente para la apertura de semillas, la que mal realizada puede generar mermas significativas en la producción.

Palabras clave: Pine nuts, Equipos de clasificación y limpieza, frutos secos, pinoli.

SUMMARY

The production of Mediterranean pine nuts from *Pinus pinea* L. is presented as a dynamic sector with a promising future. The growing global demand for pine nuts as a healthy food, together with their high market value, drive the development of this industry. In Chile there are no service providers dedicated to the processes linked to the post-harvest of the Mediterranean pine nut and, at the same time, there is a lack of general information to be able to carry out these tasks or to have access to replicate these machines and their processes.

In this study, the processing of the Mediterranean pine nut was analyzed and optimized in a three-phase system (pine nut splitter, calibrator, pine nut splitter), identifying and correcting critical points in order to minimize losses in the pine nut shelling process, ensure the correct selection of the fruit in three sizes, which allow the selection of a target market and help prevent fruit splits in the pine nut splitting process. The morphology, physical properties and behavior of the seed in relation to humidity were also characterized. This is essential information for post-harvest processes, especially for seed splitting, since poor performance of this process can lead to significant losses in production.

Key words: Pine nuts, Sorting and cleaning equipment, nuts



INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las plantaciones de pino piñonero (*Pinus pinea*) han cobrado mayor relevancia, estimándose que más de 5.000 hectáreas se han establecido en la última década, impulsadas por el alto potencial comercial del piñón. De estas, solo 100 hectáreas fueron plantadas antes de 2014, distribuyéndose principalmente entre las regiones de Coquimbo y Los Lagos (Loewe & Delard, 2016; Loewe *et al.*, 2025). Originalmente introducida en Chile como especie ornamental, *Pinus pinea* también se utilizó para la estabilización de dunas costeras, control de erosión y sombra para el ganado (Ávila *et al.*, 2020).

Esta especie es nativa de la cuenca del Mediterráneo, en países como España, Italia, Portugal y Marruecos, donde su principal interés radica en las semillas o piñones, conocidos como piñón mediterráneo. Este fruto seco es altamente valorado internacionalmente en el mercado de frutos secos, destacándose por su exclusividad y alto precio de comercialización (González, 2014). Con un consumo global en constante crecimiento, la demanda anual del piñón mediterráneo aumenta aproximadamente un 7-8% (Loewe & Delard, 2016).

Desde 2008, el Instituto Forestal (INFOR) ha liderado diversos proyectos de investigación enfocados en modelos productivos para esta especie y en la identificación de zonas potenciales para su establecimiento en Chile (Ávila *et al.*, 2020). La producción de piñas es mayor en las zonas más australes, atribuible al incremento de precipitaciones y temperaturas medias en etapas clave del ciclo reproductivo. Según estudios, la producción de piñas en Chile varía entre 2.355 y 3.183 kg/ha, superando a países como Italia (500-1.500 kg/ha), Portugal (700-900 kg/ha, con máximos de 7.000 kg/ha) y Túnez (media de 1.599 kg/ha) (Loewe & Delard, 2016).

A pesar de su alto potencial, existen brechas significativas en las labores de cosecha, postcosecha y mecanización que limitan el desarrollo de esta industria. En un proyecto anterior, (*Desarrollo de Técnicas de Manejo para Producir Piñones de Pino piñonero (Pinus pinea L.), una opción atractiva para Chile*, FONDEF4064632131) el INFOR importó máquinas para el procesamiento de piñas, pero su desempeño se vio afectado por múltiples puntos críticos, como la dureza, variabilidad en tamaño y morfología del fruto. Además, estas máquinas no fueron diseñadas específicamente para el procesamiento de *Pinus pinea L.*, ya que como se nombró, en el ámbito comercial el término "piñones" (o "pine nuts" en inglés) abarca los frutos de diversas especies del género *Pinus*.

La morfología de las semillas varía según la especie, en aspectos como tamaño, peso, forma y dureza (Greene & Johnson, 1993; Cervantes *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2020; González & Loewe, 2012), lo que implica que la calibración y adaptación de estas máquinas debe ajustarse a la especie para la que fueron diseñadas. Este estudio aborda estas variables con el objetivo de mejorar y validar tecnologías para el procesamiento de postcosecha de piñas de *Pinus pinea* en Chile.

MATERIAL Y MÉTODO

El estudio se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33°34'11"S 70°37'50"W), ubicada en La Pintana, Santiago, entre los años 2023 a 2025. Se emplearon tres máquinas en secuencia: la rompedora de piñas (máquina 1), la calibradora de semillas (máquina 2) y la rompedora de semillas y limpiadora de piñones (máquina 3). La máquina 1 separa las semillas de las brácteas y el corazón de la piña; la máquina 2 clasifica las semillas en tres calibres homogéneos; y la máquina 3 rompe las semillas y separa los piñones blancos de las cáscaras.

El trabajo incluyó la caracterización inicial de las máquinas, la identificación de problemas, la implementación de modificaciones y la validación de las mejoras a través de ensayos.

Tratamientos y Diseño Experimental

- *Máquina 1, rompedora de piñas.*

Se evaluó los factores de posición del limitador, el cual regula si hay expulsión o no de material por la salida de expulsión de raquis (Figura 2c), y apertura de brácteas según el tiempo de secado de las piñas (2,5, 5 y 10 días). Se procesaron 40 piñas para los tratamientos de 2,5 y 10 días, y 20 piñas para el secado de 5 días, en configuraciones con y sin limitador. Cada tratamiento se repitió 3 veces. Se registraron semillas completas, trozos, cáscaras y brácteas recolectadas en las salidas del sistema de limpieza (suelo, harnero sistema limpiador, salida rotor y salida ventilador), y se verificó el material residual en el sistema de extracción por aire.

- *Máquina 2, calibradora de semillas*

Se probaron cribas de diámetros 11,0; 10,5; 10,0; 9,5; y 9,0 mm para optimizar la separación de las semillas en tres grupos de tamaño (calibre), donde los tres grupos fueran de similar peso. Se procesaron 60 Kg de semillas en 10 repeticiones de 6 Kg.

La máquina calibradora cuenta con 3 salidas, la salida 1 corresponde a las semillas más grandes y restos de brácteas las cuales no lograron pasar por el primer harnero; la salida 2 corresponde a las semillas que lograron atravesar el primer harnero, pero no el segundo; la tercera salida corresponde a las semillas y material que logró pasar por ambos harneros. Las semillas de las salidas 1 y 3 permanecieron sin cambios, mientras que las de la salida 2 se reprocesaron directamente sobre el segundo harnero para mejorar la separación. Se evaluó peso, largo y ancho de las semillas recolectadas.

- *Máquina 3, rompedora de semillas y limpiadora de piñones*

Se realizaron pruebas de firmeza con semillas clasificadas por la máquina calibradora y también se efectuaron pruebas de 20 semillas al azar de piñas de 8 localidades distintas: Quilvo, Cahuil Viejo, El Carmen, Apalta, Toconey, Verallia, Constitución y Santo Domingo, distribuidas entre las regiones de Valparaíso y Ñuble. Para este efecto, se seleccionaron 2 piñas al azar por localidad, de cada una de las cuales se extrajo 20 semillas que fueron sometidas a presión con un cilindro de gas para determinar el punto de ruptura (**Figura 1**). Se registró los datos de peso, largo, ancho y presión necesaria (bares) para romper cada semilla. Este enfoque permitió identificar y validar mejoras específicas para optimizar el procesamiento de piñas y piñones de *Pinus pinea*.

Se efectuaron también Pruebas de Firmeza a Distintas Humedades y Pruebas de Rompimiento. En las primeras se evaluó los beneficios de humedecer las semillas antes del rompimiento. Para ello, se usó grupos de 20 semillas del mismo calibre, sometidas a humedecimiento durante 2,5; 4; 8 y 20 horas, más un grupo control sin humedecer. Posteriormente, se realizaron pruebas de presión para determinar el punto de ruptura.

Para las Pruebas de Rompimiento se usó el procedimiento operacional de una empresa española productora de piñones, que consiste en mojar las semillas, dejarlas macerar en un depósito durante 12 horas, repetir el proceso de humedecimiento, y macerar otras 12 horas. Este procedimiento busca aumentar la elasticidad, reduciendo las pérdidas por piñones rotos durante el proceso de rompimiento de la cáscara. Para la evaluación, se utilizó 75 semillas humedecidas según este método y 75 sin humedecer, todas del mismo calibre. Se ajustó la distancia óptima de los rodillos para el calibre, y se comparó la cantidad de piñones enteros obtenidos con respecto a los que sufrieron daños mecánicos.



Figura 1. Máquina neumática de determinación de firmeza de cascara (Universidad de Kiel, Kiel, Alemania, fabricación propia)

Análisis de Resultados

Los datos obtenidos de la máquina rompedora de piñas se analizaron mediante un diseño de bloques completos al azar (DBCA) con estructura factorial de tratamientos (1). Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programa InfoStat.

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + (AB)_{(ij)} + \beta_k + \varepsilon_{ijkl} \quad (1)$$

Donde;

Y_{ijkl} es la variable respuesta,

μ es la media general,

A_i es el efecto del tiempo de secado al sol,

B_j es el factor limitador,

$(AB)_{(ij)}$ es la interacción entre el tiempo de secado y el uso del limitador

$\beta_{(k)}$ es el efecto bloque y

ε_{ijkl} es el error experimental, el cual se asume normalmente distribuido.

Para evaluar los resultados de las pruebas de la máquina calibradora (máquina 2) y de la resistencia de las semillas, se realizó una prueba de comparación múltiple de Fisher, con un nivel de significancia menor o igual al 5% ($p \leq 0,05$), esto con el fin de comparar los procedimientos e identificar el óptimo. Los análisis estadísticos se realizaron con el software InfoStat.

RESULTADOS

El proceso para producir piñones pelados incluye la ruptura de piñas, limpieza de semillas, clasificación por calibre, rompimiento de semillas y limpieza de piñones blancos. Este trabajo requiere tres máquinas: la rompedora de piñas, la calibradora y la rompedora de semillas, que operan de forma independiente, pero en secuencia.

La máquina 1 rompe las piñas y limpia las semillas, separándolas de las brácteas y el corazón de la piña. La máquina 2 clasifica las semillas en tres calibres mediante harneros. Finalmente, la máquina 3 rompe las semillas con un sistema de rodillos para obtener los piñones pelados, que luego son limpiados mediante harneros que separan el piñón blanco de los restos de semillas.

Maquina 1: Rompedora de Piñas

La utilización de la máquina rompedora de piñas puede ser independiente del resto de las máquinas, ya que puede ser utilizada también como sistema para solamente obtención de semillas, ya sea para su uso en viveros, o bien para su comercialización.

- *Componentes*

La máquina partidora de piñas consiste en un molino de garras o púas, que se encuentra al interior de un tambor de 40 cm de diámetro y un largo total de 1,2 metros, dentro del cual, los primeros 100 cm corresponden al sistema de rompimiento como tal. Siendo el resto destinado a la eliminación de los raquis y brácteas por expulsión. Las piñas se parten mediante el aplastamiento entre las púas y las paredes del tambor. Las garras del sistema rompedor de piñas están dispuestas en 9 grupos de cuatro púas, cada una con largos diferentes (**Figura 2**, derecha).



Figura 2. Detalle de la partidora de piñas. a) Tambor rompedor; b) tolva de alimentación; c) Sistema de expulsión de raquis. A la derecha, esquema trasversal de las garras del molino.

La máquina rompedora de piñas utiliza sistemas de limpieza con cribas circulares y harneros, logrando un 95% de limpieza en las semillas. Sin embargo, el proceso no es totalmente eficiente, y algunos piñones pueden quedar en los restos de las piñas, representando pérdidas. El material restante se limpia con 4 aspiradoras que eliminan la mayoría de los restos de brácteas.

La única regulación disponible, aparte de la intensidad de carga, es un limitador en la zona de rompimiento, que controla el tiempo de permanencia de las piñas en esa área (**Figuras 3 y 4**). Con el limitador abierto, las piñas pasan rápidamente, lo que puede dejar semillas adheridas a las brácteas o expulsarlas junto con

material grueso. Esta configuración permite un trabajo más fluido, pero requiere repasar manualmente o con la máquina el material sobrante.

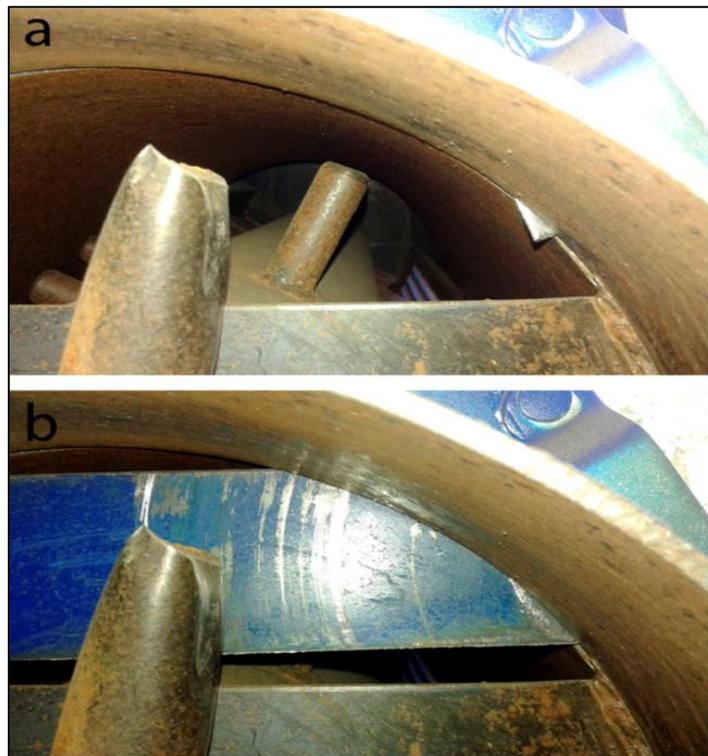


Figura 3. Abertura regulable del tambor: a) Abierto; b) Cerrado



Figura 4. Limitador del sistema rompedor de piñas.

Con el limitador cerrado, las piñas permanecen más tiempo en la máquina, lo que reduce las pérdidas, pero disminuye la producción. Con un operario, el proceso es más lento; con dos, uno puede encargarse de la carga y el otro del manejo del limitador. Una mala regulación puede causar excesivo rompimiento de piñas y semillas

- *Problemas y soluciones*

En el **Cuadro 1**, se aprecia un resumen de los problemas asociados y las soluciones realizadas en la maquina rompedora de piñas.

Cuadro 1. Problemas identificados y soluciones implementadas en maquina rompedora de piñas.

Problema y/o imperfecto	Solución y/o mejora
Perdida semillas por harnero en sinfín alimentador.	Levantar estructura con instalación de soportes para establecer bandeja receptora.
Apertura del limitador en punto inferior genera aglomeraciones de suciedad y trabazón del alimentador.	Modificación física del alimentador para cambiar el punto mínimo inferior.
Perdida de semillas por harnero separador de brácteas-semillas	Modificación del tamaño de las cribas del harnero separador brácteas-semillas

La máquina rompedora de piñas, se utiliza para extraer las semillas de las piñas. Su capacidad de procesamiento con compuerta cerrada es de 0,75 ton/h, operada por un solo trabajador encargado de abrir sacos, cargar piñas y controlar el limitador.

La principal modificación realizada fue en el sistema de limpieza. Dado que las semillas recolectadas contenían brácteas, algunas más grandes que las semillas, se reemplazó el harnero inferior del sistema partidor por uno de menor diámetro (**Figura 5**).

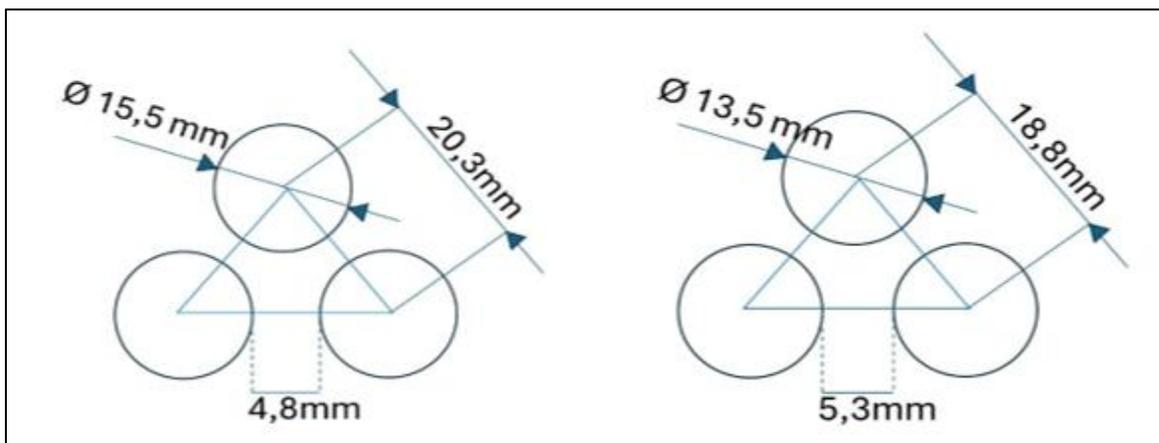


Figura 5 Esquema de modificación de diámetro del harnero. Izquierda original, derecha nuevo.

- *Resultados evaluaciones*

Con la compuerta abierta, se obtiene el doble de pérdida total, explicada en su mayoría por las pérdidas presentes en el rotor. Con respecto a los restos o residuos, las diferencias no son tan marcadas, pero parecen ser más abundantes cuando la compuerta está abierta (tratamiento 2).

En el **Cuadro 2** se muestra el funcionamiento bajo dos condiciones de uso: con compuerta limitadora abierta (libre paso del material hasta el exterior), y con la compuerta cerrada combinada con su apertura esporádica, manteniendo material más tiempo antes de liberarlo.

Cuadro 2. Resultado del comportamiento de la máquina rompedora de piñas con limitador cerrado-abierto y limitador abierto siempre.

Resultados	Limitador	
	Abierto	Cerrado-abierto
Semillas		
Rendimiento piñas/semillas %	18,1	21,4
Limpieza, peso semillas/peso residuos %	95,1	94,5
Pérdidas		
Semillas (respecto total) %*	8,8	2,4
Piñones (respecto potencial) %**	0,3	0,3

*semillas que fueron eliminadas por los sistemas de limpieza o quedaron atrapadas en los restos de piña.

**corresponde al porcentaje de piñones que fueron rotos durante la ruptura de la piña con respecto al potencial que pudo obtenerse asumiendo una relación piña/piñón pelado de 0,04.

Cuadro 3. Datos obtenidos de máquina rompedora de piñas (promedio \pm error estándar).

Exposición al sol (días)	Apertura del limitador	% Residuos	Perdidas semillas (%)				
			Suelo	Harnero	Rotor	Aire	Total
2,5	Abierto	1,2 \pm 0,5	0,1 \pm 0,1	0,3 \pm 0,4	2,2 \pm 1,1	0,2 \pm 0,1	2,8 \pm 1,5
2,5	Cerrado	0,6 \pm 0,3	0,0 \pm 0,0	0,4 \pm 0,2	0,8 \pm 0,9	0,2 \pm 0,2	1,4 \pm 1,1
5	Abierto	2,9 \pm 0,3	0,1 \pm 0,1	0,4 \pm 0,2	2,5 \pm 0,5	0,1 \pm 0,2	3,2 \pm 0,8
5	Cerrado	2,1 \pm 0,7	0,0 \pm 0,0	0,6 \pm 0,3	0,6 \pm 0,3	0,4 \pm 0,5	1,7 \pm 0,3
10	Abierto	1,1 \pm 0,5	0,1 \pm 0,1	0,3 \pm 0,1	1,4 \pm 0,6	0,1 \pm 0,1	1,9 \pm 0,6
10	Cerrado	1,0 \pm 0,2	0,1 \pm 0,1	0,3 \pm 0,0	0,3 \pm 0,1	0,1 \pm 0,1	0,8 \pm 0,2

Suelo: bajo la máquina; Harnero: referido a que salen por harnero de limpieza; Rotor: referido a pérdidas por salidas junto con las brácteas; Aire, que salen por sistema de limpieza por aire

Se determinó que no hay interacción ($p > 0,05$) entre los factores "días de exposición al sol" y "condición del limitador (abierto o cerrado)", actuando de forma independiente. El factor "exposición al sol" no afecta el porcentaje de pérdidas de semillas, pero el "estado del limitador" sí tiene un efecto ($p = 0,0077$). Mediante una prueba de comparación múltiple de Fisher ($p \leq 0,05$), se confirmó que, independientemente de los días de exposición al sol, cerrar el limitador reduce las pérdidas de semillas durante el procedimiento de ruptura.

Máquina 2: Calibradora de Semillas

- *Componentes*

La máquina calibradora, permite procesar las semillas recolectadas desde la máquina rompedora de piñas, y poder separar en tres tamaños, aspecto crucial para el proceso de rompimiento posterior de las semillas. Esta máquina cuenta únicamente con un sistema de vibrador de dos harneros de diferente tamaño de criba, los cuales separan tres grupos de piñones en función de su diámetro.

El proceso de calibrado es crucial para el buen procesamiento en la máquina rompedora de semillas, ya que el traslape entre los diámetros de las semillas dificulta su rompimiento y la limpieza de los piñones.

Se utiliza un movimiento vibratorio que permite separar en tres tamaños de semillas mediante la existencia de dos harneros superpuestos con aberturas de diferente tamaño (**Figura 6**).



Figura 6. Criba del harnero superior de la máquina calibradora

Bajo cada harnero, se encuentra una malla con pequeñas esferas de goma que rebotan con la vibración, las cuales golpean aquellas semillas que se quedan atascadas en la criba del harnero, el cual tiene perforaciones oblongas de 25 mm de largo.

El movimiento vibratorio junto con la pendiente de los harneros transporta los grupos de semillas a cada una de las tres salidas según se muestra en la **Figura 7**.

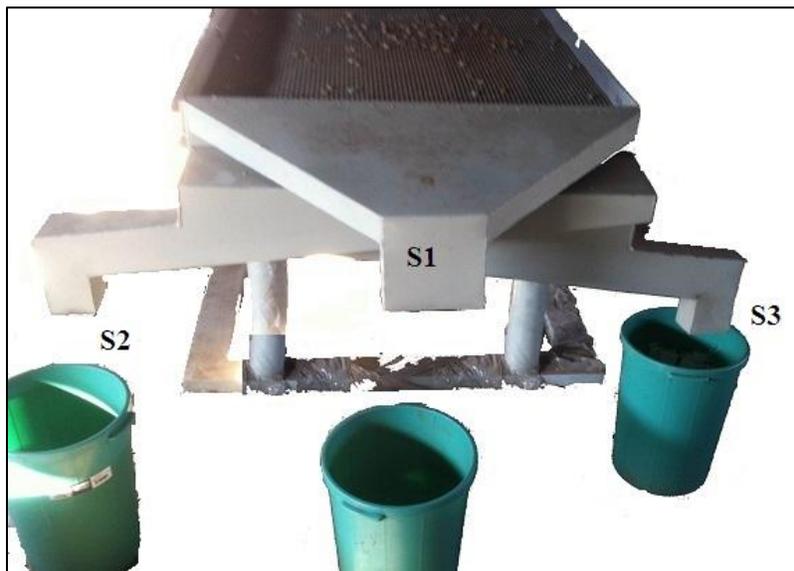


Figura 7. Máquina calibradora con sus tres salidas.

Luego, en función de su tamaño o calibre, las semillas procesadas saldrán por alguna de las tres salidas de la máquina, de acuerdo con el detalle del **Cuadro 4**.

Cuadro 4. Tamaño medio de las semillas obtenidas en cada salida de la máquina calibradora.

Salida	Diámetro promedio (mm)
S1	10,99
S2	10,32
S3	8,61

- *Problemas y soluciones*

En el **Cuadro 5**, se aprecia un resumen de los problemas asociados y las soluciones realizadas a la máquina calibradora

Cuadro 5. Problemas identificados y soluciones implementadas en máquina calibradora de semillas.

Problema y/o imperfecto	Solución y/o mejora
Separación muy heterogénea de las semillas en 3 calibres, tanto en tamaño como en cantidad.	Cambio de harnero de cribas ovaladas por cribas redondas
	Pruebas de distribución en diferentes diámetros de cribas redondas para determinar el más adecuado.

Para una buena calibración, se recomienda pasar las semillas unas 5 veces por la máquina 2, con un rendimiento mínimo de 45 Kg/h, basado en pruebas de maquinaria donde no hubo limitaciones para procesar mayores volúmenes. La capacidad máxima de volumen de procesamiento aún es desconocida.

Con dos harneros de limpieza, las semillas y restos de suciedad se distribuyen en tres salidas, manteniéndose en la salida 1 los materiales y semillas que no atravesaron los harneros. El **Cuadro 6** muestra la distribución de las semillas entre las tres salidas de la máquina y el porcentaje de material limpio, es decir, la relación entre el peso de las semillas y los residuos.

Cuadro 6. Porcentaje de las semillas obtenidas en cada salida de la máquina clasificadora.

Resultados	Salidas		
	S1	S2	S3
Semillas (% del total)	1,3	10,6	88,1
Semilla limpia (%)	65,1	95,5	97,7

Los harneros de esta máquina no clasifican correctamente, ya que el 88,1% de las semillas se concentran en la Salida 3. Como solución, estas semillas se reprocesan con los harneros de la máquina 3 (rompedora de semillas), separándolas en dos grupos (**Cuadro 7**). El uso de harneros ovalados y la forma ovalada de las semillas provoca una clasificación inexacta, ya que las semillas pueden quedar mal distribuidas según cómo caigan en las perforaciones, lo que afecta la calidad del posterior rompimiento. Las semillas S1 y S2 de la calibradora se juntan en un solo grupo denominado S1' (o semillas-Grandes), Las semillas S3 de la Calibradora se pasan por los harneros de limpieza de la Rompedora de semillas, la cual también cuenta

con 3 salidas, pero en este caso sólo se utilizarán las salidas 1 y 2 de esta máquina, ya que la tercera salida sólo sale basura fina, de esta manera, las dos salidas a utilizar constituyen los grupos S2' y S3' (semillas medianas y pequeñas)

Cuadro 7. Distribución de las semillas tras ser calibradas secuencialmente con los harneros de la máquina calibradora y posteriormente con los de la máquina rompedora de semillas.

Resultados	Calibración con maquina Calibradora			Calibración con harneros de limpieza de máquina rompedora de semillas		
	S1	S2	S1'	S3	S2'	S3'
Semillas (% del total)	1,3	10,6	11,9	88,1	41,1	47,0
Semilla limpia (%)	65,1	95,5	92,2	97,7	98,3	97,2

Considerando que los harneros ovalados no logran diferenciar si se calibra por diámetros máximos o mínimos, sino que por la posición que haya caído la semilla, es que se determinó cambiarlos por harneros de perforación redonda (**Figura 8**), lo cual permitiría reducir en parte la variabilidad, al separar en ese caso por diámetros máximos, aunque la maquina rompedora tiende a romper por diámetros mínimos.

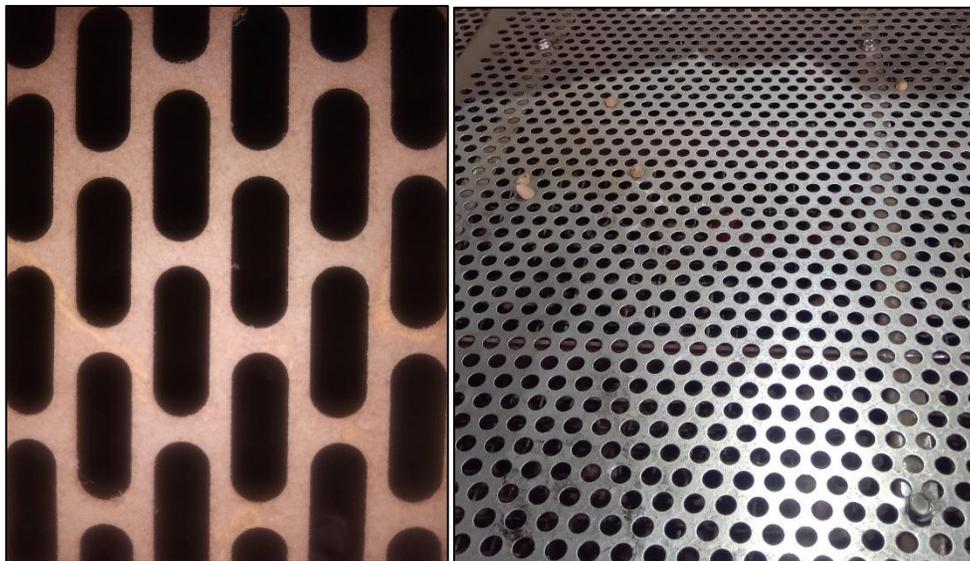


Figura 8. Harneros originales de perforación ovalada (izquierda) y harneros de reemplazo con perforación redonda (derecha)

Se realizó un análisis preliminar de los datos históricos disponibles, y así determinar que diámetros logran separar la población de semillas en tres grupos uniformes. Se utilizó, más de 6.000 registros obtenidos entre los años 2017 y 2022, determinándose que las poblaciones se separaban en diámetros máximos de 8,54 y 9,41 milímetros (**Figura 9**). En la **Figura 10** se muestra la distribución de los diámetros máximos de las semillas según localidad.

Al probar los harneros de 8,5 y 9,5 mm no se logró obtener las agrupaciones esperadas, por lo que se evaluaron múltiples medidas procesando 60 kilos de semilla. Se analizaron tanto las medidas de apertura de harneros preseleccionadas, como otras superiores, ya que las primeras no garantizaban una separación

precisa. Finalmente, se identificaron rangos preferenciales y se probaron harneros con perforaciones de 8, 9, 10 y 11 mm, determinando la necesidad de realizar pruebas con harneros de 9,5 y 10,5 mm (**Cuadro 8**).

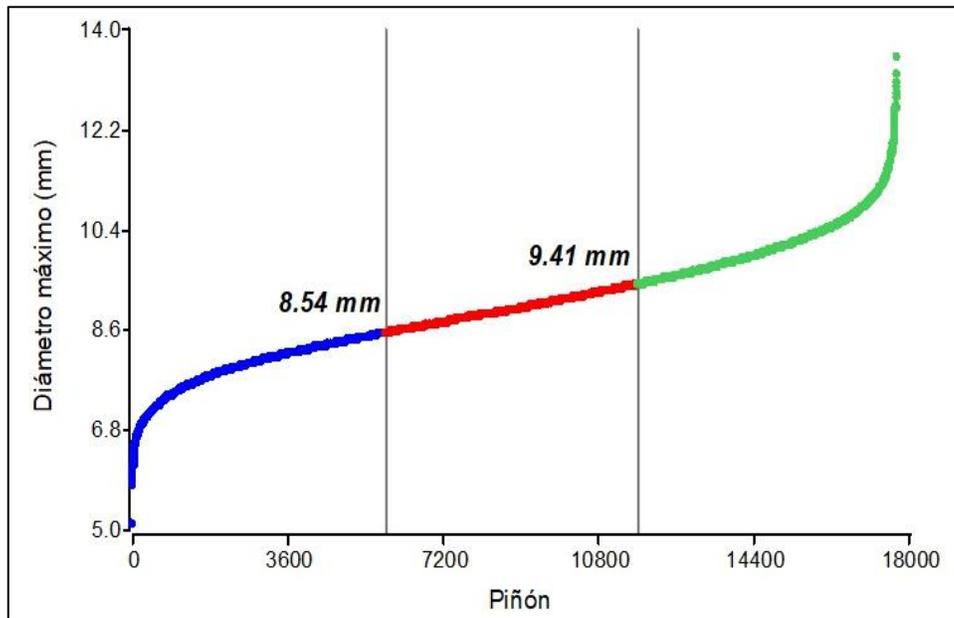


Figura 9. Distribución del diámetro máximo de semillas y separación en tres grupos de igual cantidad de semillas (n= 6.000 semillas).

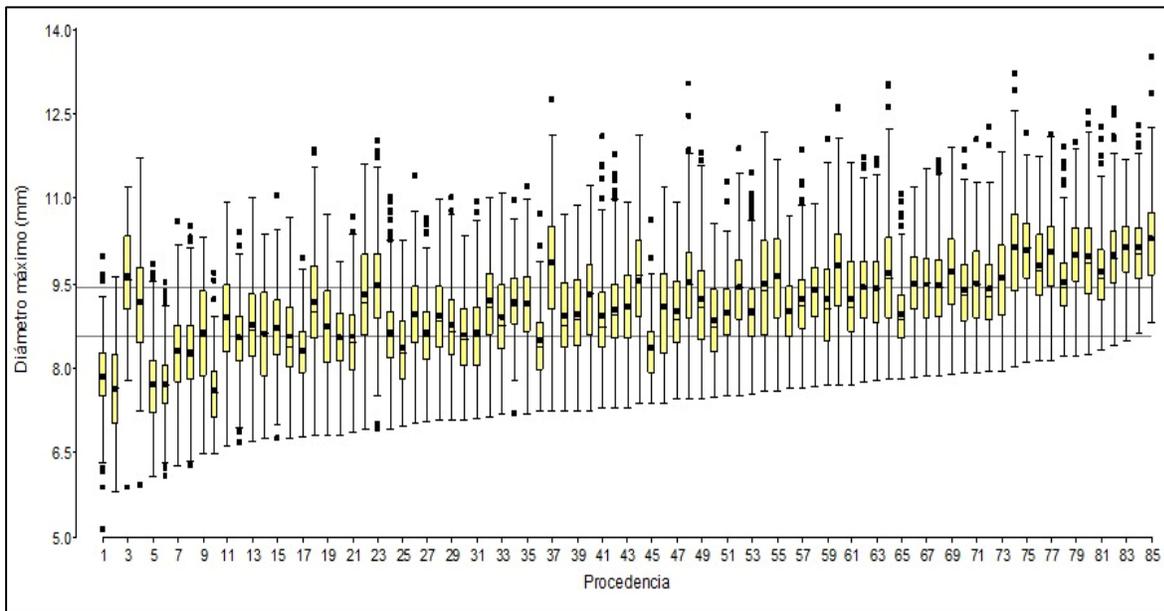


Figura 10 Distribución de las medidas de diámetro máximo según localidad.

Intentando obtener grupos lo más parecidos posible, se seleccionó los harneros de 10,5 y 9,5 mm, procediéndose a cambiar los harneros existentes previamente por unos nuevos de dichas medidas. En la **Figura 11** se aprecia con más detalle la configuración de las perforaciones de estos harneros.

Cuadro 8. Distribución porcentual de las semillas en cada una de las tres salidas según tamaño de los dos harneros de la máquina calibradora de semillas.

Medida harneros (mm)	Salida	Semilla en cada grupo (%)	Peso en cada grupo (%)
10	1	39,52	46,15
	2	41,83	39,53
	3	18,65	14,32
9	1	10,13	12,48
	2	71,22	73,20
	3	18,65	14,32
11	1	10,13	12,48
	2	29,39	33,67
	3	60,48	53,85
10,5	1	20,73	24,71
	2	61,75	60,89
	3	18,65	14,32
9	1	10,13	12,48
	2	10,59	12,23
	3	80,40	75,21
11	1	39,52	46,15
	2	24,56	23,53
	3	36,64	30,32
9,5	1	10,13	12,48
	2	53,95	57,20
	3	36,64	30,32
10,5	1	20,50	24,71
	2	44,26	44,89
	3	36,64	30,32
11	1	10,02	12,48
	2	10,48	12,23
	3	79,50	75,21
10,5	1	10,02	12,48
	2	10,48	12,23
	3	79,50	75,21

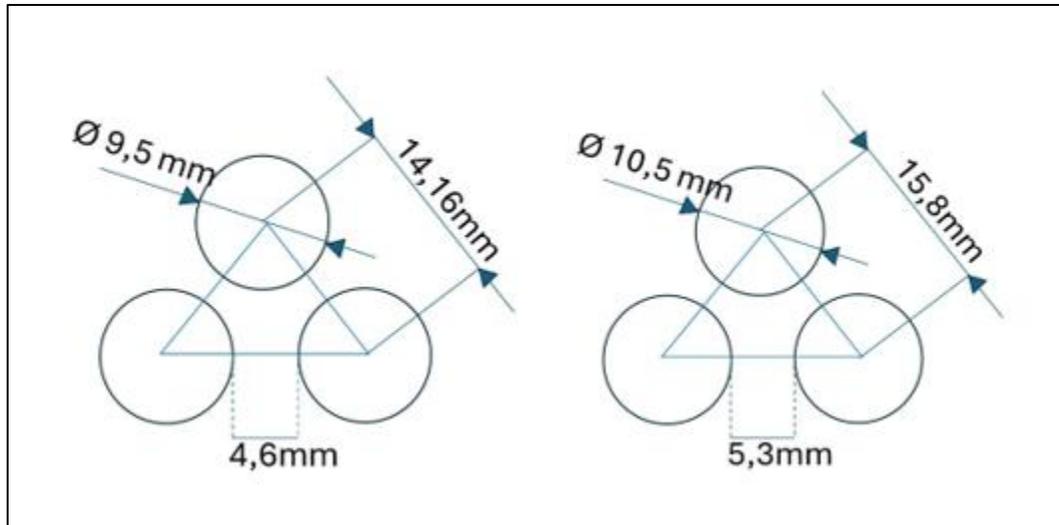


Figura 11. Detalles de la distribución de las perforaciones en los harneros de reemplazo de la máquina calibradora, siendo el diagrama de la derecha el harnero superior y el de la izquierda el inferior.

Un problema asociado a este método de separación de semillas por calibre, mediante su paso a través de dos harneros ubicados uno sobre el otro, es que las primeras semillas que pasen por el harnero superior estarán más tiempo sobre el harnero inferior, aumentando así su posibilidad de poder ser separadas; por el contrario, las semillas que tarden más en pasar el primer harnero tendrán menos tiempo en el harnero inferior. En la **Figura 12** se ilustra esta situación, donde las primeras semillas en pasar el primer harnero (amarillo) pueden recorrer más distancias (rojo y azul), mientras que las semillas que logren pasar más al final (verde) solo podrá estar en zona azul.

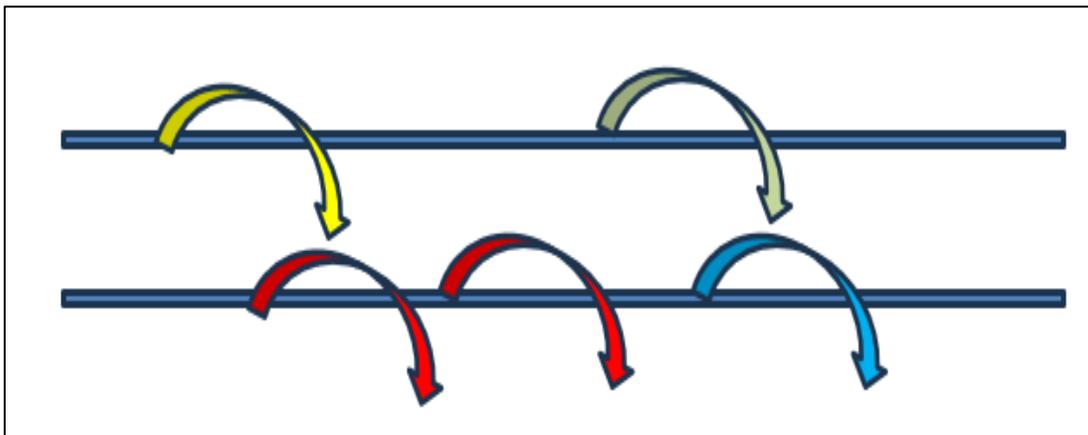


Figura 12. Esquematación de la clasificación de semillas por calibre, utilizando un sistema de dos harneros superpuestos.

Tal problema se logra solucionar parcialmente repasando las semillas del primer harnero, aumentando de esa forma la posibilidad que caigan al inicio y no al final, sin embargo, las semillas del segundo harnero no pueden ser repasadas. Por dicha razón se diseñó y construyó una adaptación consistente en crear un espacio al inicio del primer harnero (el superior), de modo que las semillas del segundo harnero (el inferior), ahora sí pueden ser repasadas al colocarlas directamente en él a través del espacio que se realizó en el

primer harnero (**Figuras 13 y 14**).

- *Resultados evaluación*

Las evaluaciones de calibración se realizaron con tres prototipos: (1) máquina original (sin modificar); (2) máquina reformulada (con harneros nuevos); y (3) máquina con adaptación (con harneros nuevos y acceso directo como en **Figuras 13 y 14**). Según los valores promedios de las segundas pasadas (**Cuadro 9**), el prototipo 3 mejora la clasificación al aumentar un 10% la salida de semillas por la salida 2 respecto al prototipo 2, incrementando la repetibilidad.

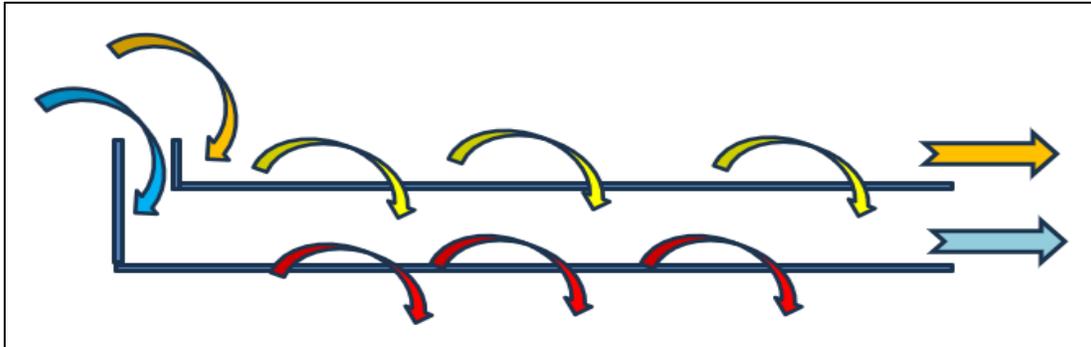


Figura 13. Esquemización de la clasificación de semillas por calibre, utilizando el sistema de dos harneros superpuestos modificado.



Figura 14. Detalles de la modificación del primer harnero, para tener acceso directo al harnero inferior para repaso de las semillas.

Cuadro 9. Porcentaje de semillas obtenidas al repasar (pasar por segunda vez) las semillas de cada salida de 3 prototipos de la máquina calibradora de semillas.

Prototipo	Primera pasada	Segunda pasada	n	Media	D.E.
1 (Original)	Salida 1	Salida 1 (%)	10	93,95	1,84
		Salida 2 (%)	10	3,80	2,31
		Salida 3 (%)	10	2,25	2,84
	Salida 2	Salida 1 (%)	10	1,95	0,49
		Salida 2 (%)	10	94,65	0,79
		Salida 3 (%)	10	3,39	0,82
	Salida 3	Salida 1 (%)	10	0,24	0,13
		Salida 2 (%)	10	13,18	9,10
		Salida 3 (%)	10	86,56	9,19
2 (Reformulado)	Salida 1	Salida 1 (%)	10	73,80	25,69
		Salida 2 (%)	10	18,21	4,15
		Salida 3 (%)	10	7,98	22,25
	Salida 2	Salida 1 (%)	10	13,04	1,77
		Salida 2 (%)	10	74,28	1,81
		Salida 3 (%)	10	12,67	2,97
	Salida 3	Salida 1 (%)	10	14,60	28,96
		Salida 2 (%)	10	24,60	11,45
		Salida 3 (%)	10	60,81	22,97
3 (Adaptado)	Salida 1	Salida 1 (%)	10	73,80	25,69
		Salida 2 (%)	10	18,21	4,15
		Salida 3 (%)	10	7,98	22,25
	Salida 2	Salida 1 (%)	10	0,00	0,00
		Salida 2 (%)	10	84,99	4,23
		Salida 3 (%)	10	15,01	4,23
	Salida 3	Salida 1 (%)	10	14,60	28,96
		Salida 2 (%)	10	24,60	11,45
		Salida 3 (%)	10	60,81	22,97

El prototipo 1 distribuye mejor en un repaso y no muestra diferencias significativas tras una segunda pasada. Sin embargo, su clasificación inicial es deficiente, ya que solo logra separar en dos grupos similares, lo que lo hace inadecuado para obtener tres grupos homogéneos necesarios para el trabajo eficiente en la máquina 3 (rompedora de semillas).

Máquina 3: Rompedora de Semillas y Limpiadora de Piñones

- *Componentes*

Esta máquina está conformada por un sistema rompedor de semillas que posee un cilindro aprisionador encargado de romper las semillas y un sistema vibratorio de harneros de limpieza que permite la obtención final de piñones (**Figura 15**).

Las semillas depositadas en el rompedor de semillas caen a un sistema que las presiona entre un rodillo y una contra-estructura plana que es regulable en su distancia hacia el rodillo, dependiendo de los tamaños de las salidas de la máquina calibradora (**Figuras 16 y 17**). Estos dos subcomponentes poseen una separación regulable de tal forma que sea capaz de romper la cáscara sin romper el piñón en su interior. Los subproductos de este proceso caen sobre el sistema vibratorio de harneros de limpieza.

La separación del rodillo rompedor estático se debe realizar manualmente, mediante la liberación del soporte de la contra-estructura soltando la tuerca 1 señalizada en la **Figura 18**.

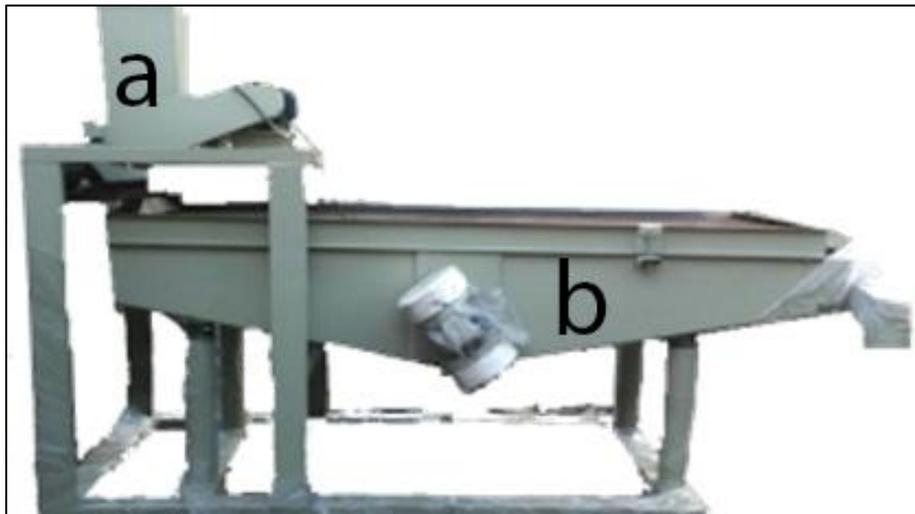


Figura 15. a) Rompedor de semillas; b) Harneros de limpieza de piñones.

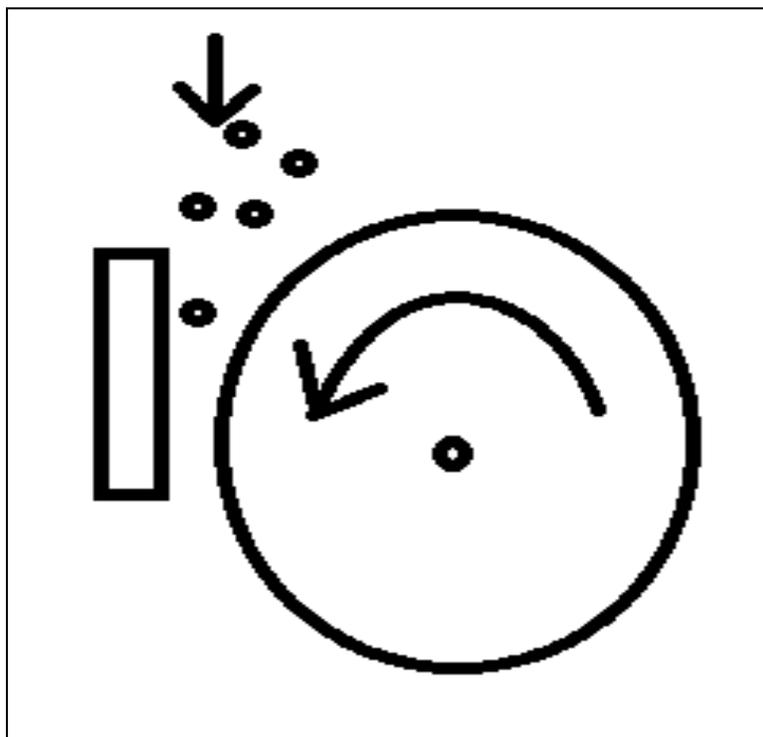


Figura 16. Vista transversal del rodillo y contra estructura del rompedor de semillas.

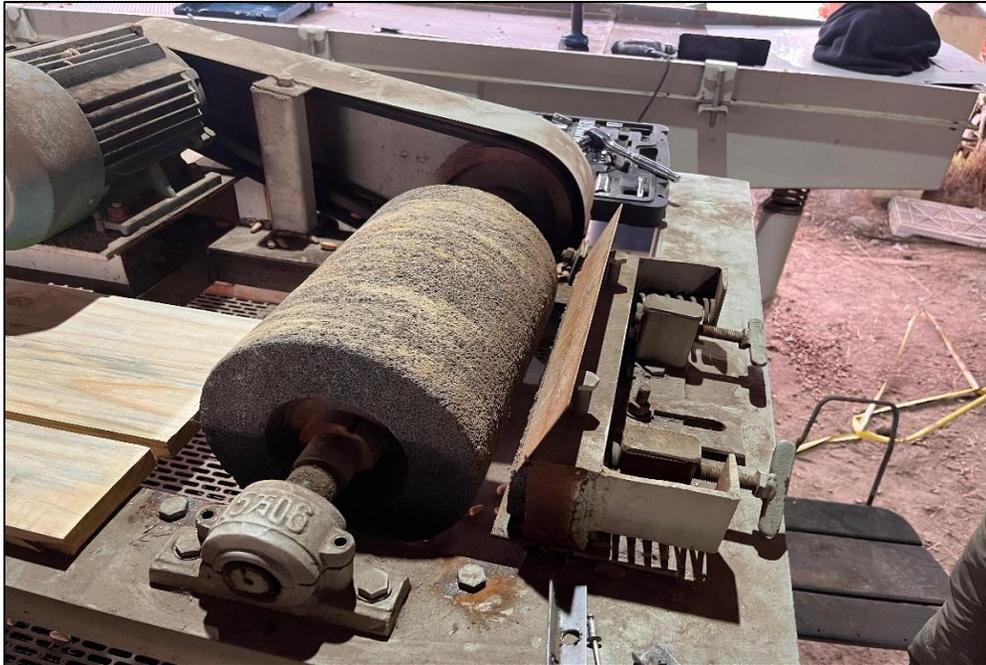


Figura 17. Vista del rodillo rompedor estático con la contra-estructura removida de la partidora de semillas.

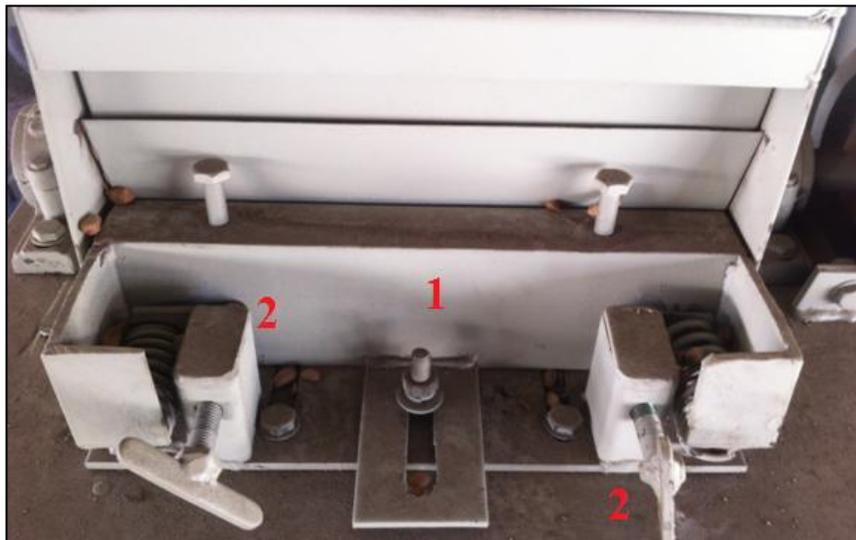


Figura 18 Detalle del sistema de regulación de la compresión del rompedor de semillas. 1 Soporte; 2 mariposas de regulación.

Después de elegirse la separación adecuada, se procede a reapretar la tuerca 1 para mantener firme el elemento de soporte. Ajustes menores se pueden hacer con las mariposas de regulación de la **Figura 18**, pero deben ajustarse correctamente ya que hace cambiar la distancia en forma dispereja.

El material que ha pasado por el sistema rompedor, pasa después a un sistema de limpieza compuesto

por 2 harneros. El tamaño de criba fue diseñado para separar semillas no rotas y cáscaras, de los piñones y trozos pequeños de cascara, y debe ser intercambiado dependiendo del tamaño del calibre de entrada de semillas (S1, S2 y S3).

En condiciones ideales, debiese existir una malla para cada uno de los tres calibres descritos anteriormente, siendo el harnero más pequeño que la semilla, pero más grande que el piñón, para así poder separar arriba las semillas no rotas, como los trozos grandes de cáscaras, dejando en la segunda salida los piñones con restos de cáscaras, y en la tercera los elementos más pequeños, como aquellos piñones rotos.

- *Problemas*

En el **Cuadro 10**, se aprecia un resumen de los problemas identificados y las soluciones implementadas en la maquina rompedora de semillas y limpiadora de piñones.

El partidador de semillas del diseño original de la máquina utilizaba un sistema de rompimiento con un rodillo y una contra-estructura plana (**Figuras 16, 17 y 18** anteriores), presentando dos problemas principales: (1) la regulación de la distancia entre la pieza plana y el rodillo tenía dos puntos de ajuste, dificultando el paralelismo, y (2) el rozamiento entre el rodillo y la estructura plana causaba desgaste en la superficie de la semilla sin lograr la ruptura deseada.

Respecto a los harneros de limpieza, las semillas no rotas se procesan aproximadamente 5 veces, con un rendimiento actual de 6 Kg/h. Estas semillas se combinan con las del calibre menor siguiente tras cada pasada.

Cuadro 10. Problemas identificados y soluciones implementadas en maquina rompedora de semillas y limpiadora de piñones.

Problema y/o imperfecto	Solución y/o mejora
Deficiente ruptura de semillas en el sistema rompedor de rodillo con contra-estructura lisa.	Modificación de sistema rompedor, reemplazando la contra-estructura lisa por un rodillo ajustable.
Ruptura irregular de semillas debido a que el regulador de tamaño no se calibra de forma paralela.	Modificación del sistema de regulación para que funcione de modo paralelo.

El desempeño del sistema rompedor de semillas depende de una correcta calibración de las semillas en la máquina calibradora (**Cuadro 11**). Según el calibre de entrada (S1', S2', S3), se debe cambiar el harnero superior de la máquina rompedora por uno con cribas adecuadas. La falta de este ajuste reduce la eficiencia de limpieza, aumenta las pérdidas y exige más limpieza manual. De igual manera se detectó la presencia de semillas semirrotas, en las cuales, aunque se observó cascara fragmentada por el sistema rompedor, esta ruptura no fue capaz de liberar al piñón.

Aunque las máquinas cumplen sus funciones específicas, solo la rompedora de piñas funciona correctamente. Las otras dos han presentado problemas debido a que las medidas de las semillas no corresponden a las medidas proporcionadas al proveedor de la máquina, por lo que no se estaría realizando una calibración correcta, lo cual afecta el funcionamiento de los harneros. Esto obliga a usar ambas máquinas (la calibradora y la rompedora de semillas) para definir los tres grupos, lo que limita el adecuado desempeño de la calibración, y donde solo el grupo S2' (medianas) opera correctamente. Es necesario reemplazar los harneros por otros con medidas adecuadas y establecer los rangos de tamaño en la calibradora para optimizar su uso en la rompedora.

Cuadro 11. Resultado sistema rompimiento según calibre de entrada.

Resultados	Tamaño semillas		
	Grandes (S1')	Medianas (S2')	Chicas (S3')
Semillas rotas (%)	92,7	83,3	80,7
Semillas semirrotas (%)	0,0	0,3	1,0
Rendimiento semillas/piñones (%)*	19,8	16,2	14,9
Piñones dañados (%)	17,0	9,4	12,7
Piñones limpios (%)	89,2	76,4	72,9

* relación peso-peso

- *Soluciones*

Para solucionar las problemáticas del sistema rompedor se incorporó un nuevo rodillo, el cual cuenta con un sistema de guía móvil (**Figuras 19 a 24**). El efecto que tiene la incorporación de este nuevo rodillo es que se elimina el efecto de desgaste que generaba la contra-estructura plana, haciendo que la cáscara de la semilla tienda a fraccionarse.

Se probó con la implementación de un rodillo en base a múltiples discos de desbastes, generando así un rodillo relativamente semejante al original, de 8" de ancho y 30 cm de largo, montados con dos descansos laterales que van apoyado en el sistema que hace correr ese rodillo (**Figuras 20, 21 y 23**).

A su vez se diseñó e implementó un sistema de corredera que permita el movimiento del rodillo libre, con un movimiento lineal, en base a dos guías, pero solo un tornillo sinfín de movimiento (**Figura 23**). De esta forma se eliminó el problema presentado en modelo original, donde eran dos los tornillos, lo que provocaba que había que revisar la separación de las unidades en cada uno de los extremos, permitiendo que se pueda trabajar generando cambios en la distancia entre los dos rodillos.

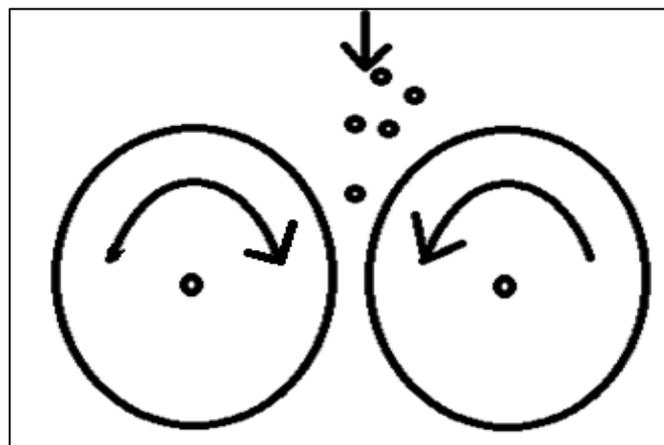


Figura 19. Adaptación sistema rompedor de semillas mediante la incorporación de un nuevo rodillo que reemplaza a la contra-estructura plana del diseño original.



Figura 20. Implementación de rodillos del nuevo sistema rompedor de semillas.



Figura 21. Rodillos del nuevo sistema rompedor de semillas

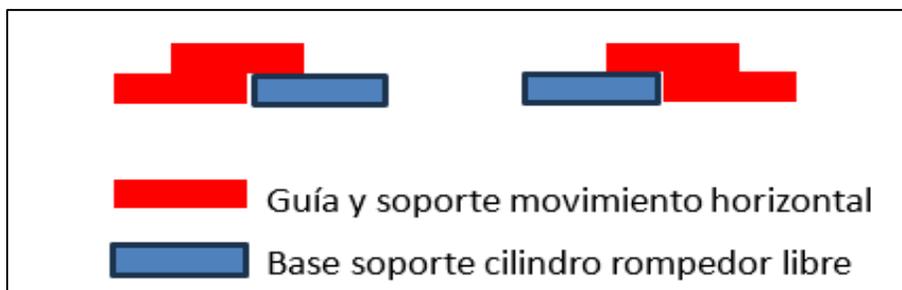


Figura 22. Sistema de guías para rodillo móvil de la rompedora de semillas modificada.

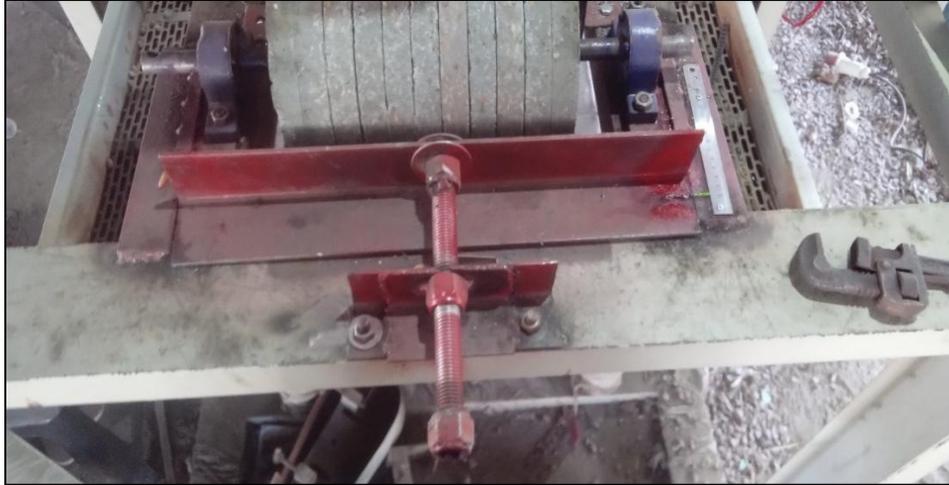


Figura 23. Sistema unitario de regulación de distancia entre rodillos de la rompedora de semillas, con un solo tornillo



Figura 24. Sistema de medición del movimiento horizontal del rodillo libre de la rompedora de semillas.

Resultados Evaluaciones

- *Prueba de Firmeza*

En los **Cuadros 12** y **13**, se muestran los resultados de caracterización y firmeza de las semillas por localidad.

Como se aprecia en los cuadros, la variación de la presión para romper la cáscara tiene estrecha relación con el origen de la semilla, afectando el ancho máximo de la semilla, no así su peso

Cuadro 12. Caracterización de las semillas según localidad.

Ubicación	Semillas					Piña		
	peso [g]	Largo [mm]	Ancho Máx. [mm]	Ancho Min. [mm]	Firmeza (Bar)	Peso [g]	Largo [mm]	Ancho [mm]
Quilvo	1,26	20,60	11,24	6,92	1,42	665,0	135,0	99,0
Cahuil	0,95	18,58	9,85	8,23	1,71	529,5	127,0	89,5
El Carmen	0,84	18,11	9,34	8,03	0,94	605,0	141,5	96,5
Apalta	0,96	18,64	10,13	8,44	1,15	389,0	119,5	76,5
Toconey	0,69	17,40	8,83	7,42	0,88	306,5	101,0	82,0
Verallia	0,87	18,57	9,39	7,76	1,23	420,5	111,5	89,5
Constitución	1,07	21,17	10,41	8,80	1,11	574,5	159,0	89,5
Sto. Domingo	0,90	18,43	9,42	8,02	1,26	496,0	126,5	88,0

Cuadro 13. Firmeza de semillas en bares según localidades de origen.

Ubicación	Medias	n
El Carmen 1	0,79 ^a	20
Toconey 1	0,81 ^a	20
Toconey 2	0,94 ^{ab}	20
El Carmen 2	1,04 ^{bc}	20
Constitución 2	1,08 ^{bcd}	20
Apalta 1	1,12 ^{cde}	20
Constitución 1	1,14 ^{cde}	20
Apalta 2	1,18 ^{def}	20
Santo Domingo 1	1,22 ^{def}	20
Verallia 1	1,23 ^{def}	20
Verallia 2	1,24 ^{ef}	20
Quilvo 1	1,25 ^{ef}	20
Santo Domingo 2	1,31 ^f	20
Quilvo 2	1,58 ^g	20
Cahuil 1	1,60 ^g	20
Cahuil 2	1,81 ^h	20

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).
1 y 2 son dos muestras por localidad

- *Pruebas de firmeza con distintas humedades*

Existe una disminución de la resistencia al rompimiento mientras más permanencia tengan las semillas en el agua (**Cuadro 14**). En relación con los restos de cáscara, visualmente no se perciben grandes diferencias en los fragmentos, siendo la única diferencia, en el caso de las semillas secas, la presencia de fragmentos levemente más grandes.

Cuadro 14. Firmeza de cascara de semillas según distintos tiempos de remojo en agua (bares)

	Semillas Secas	Tiempo de remojo de semillas			
		2,5 h	4 h	8 h	20 h
Promedio	0,98	0,82	0,70	0,71	0,67
Máxima	1,43	1,35	0,99	1,00	0,98
Mínima	0,38	0,57	0,45	0,42	0,46
Mediana	1,01	0,82	0,70	0,71	0,64



Remojar los piñones aumenta su elasticidad, reduciendo el porcentaje de piñones blancos rotos durante el rompimiento de la cáscara. Según Luis Lozano (comunicación personal, 12 de junio de 2023), este procedimiento busca mejorar la elasticidad del piñón. Además, permite descartar semillas flotantes, las cuales no contienen piñón, asegurando que la mayoría de las semillas procesadas en los rodillos sean útiles, aumentando la eficiencia del sistema.

- *Pruebas de Rompimiento*

Según recomendado, se mojaron 75 semillas del mismo calibre dos veces cada 12 horas. Tras la regulación de la máquina para el calibre determinado, se pasaron los grupos de semillas 3 veces por el sistema rompedor (sólo se pasaban las semillas sin romper). Se realizó el mismo procedimiento para semillas sin mojar. Los resultados de la prueba de rompimiento se presentan en el **Cuadro 15**.

Cuadro 15. Rompimiento de semillas en máquina rompedora de semillas.

	Semillas Seca (%)	Semillas Humedecidas (%)
Piñón Completo	56	83
Piñón Roto o dañado	44	17

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Máquina 1: Partidora de Piñas

En esta máquina se probaron dos tratamientos, uno respecto a los días de secado, y otro con respecto a la apertura del limitador de material (que puede variar entre abierto o cerrado). Según los resultados obtenidos en las pruebas, no existe un efecto significativo en relación con las pérdidas de semillas como consecuencia de los días de secado. Hay que comprender que los días de secado al sol se utilizan en la industria para aprovechar el calor otorgado por el sol, el cuál hará que la piña suelte cerca del 80% de sus piñones; para recuperar el 20% restante, las piñas abiertas deben golpearse repetidamente, o introducirse en molinos desgranadores que las rompen (González & Loewe, 2012).

Respecto a la posición del limitador, se estableció que el tratamiento con limitador cerrado, que consistía en mantener el limitador cerrado hasta los 10 segundos de haber caído la última piña, y luego abrir el limitador por 10 segundos más, presenta estadísticamente menos pérdida de semillas con respecto a mantener el limitador abierto. Este resultado se debe a que, al mantener el limitador cerrado, el tambor rompedor mantiene el material por más tiempo adentro, lo que permite una mayor disgregación de la piña, y por ende un desgranado más eficiente, ya que, al dejar el limitador abierto, el material a procesar queda menos tiempo en el tambor, con lo que se generará la tendencia a pérdida de semillas que no lograron separarse de la piña.

De igual manera, en el caso del limitador cerrado, existe un mayor porcentaje de residuos en las semillas entregadas al final del proceso, esto se debe a lo recién explicado, al mantenerse el material más tiempo en el tambor rompedor, este disgregará más el material, permitiendo una mayor cantidad de residuos con tamaño y peso similar al de las semillas y que se mezclará con las mismas.

Maquina 2: Calibradora de Semillas

Las evaluaciones se realizaron con 3 prototipos de máquinas calibradoras: la máquina original, máquina reformulada con nuevos tamaños de harneros, y máquina con adaptación, la cual aumenta la superficie de

horneado del segundo harnero. Si se analizan los valores promedios de las segundas pasadas (**Cuadro 9** de sección Resultados), o sea, al volver a pasar las semillas que salieron por cada salida, se aprecia que el porcentaje de semillas que se obtienen en la salida dos aumenta un 10% en el prototipo 3 (color rojo) con respecto al prototipo 2 (color azul), o sea, mejora la clasificación al aumentar la repetibilidad de las pasadas.

Al analizar el prototipo 1, o sea el original, este distribuye mejor en un repaso, es decir que no existen diferencias significativas con respecto a la realización de una segunda pasada, pero el problema que presenta este prototipo es que su clasificación es deficiente. Por lo mismo, y considerando que se debió utilizar las máquinas 1 y 2, logrando separar en la práctica solo dos grupos similares, resulta que, si bien la separación es más consistente, también es menos homogénea, por lo cual no es conveniente para el objetivo de hacer tres grupos parejos para un trabajo eficiente de la máquina 3 (Rompedora de semillas).

Máquina 3: Partidora de Semillas y Limpiadora de Piñones

- *Prueba de firmeza por origen.*

La variación de la presión para romper la cáscara parece tener más que ver con el origen de la semilla y en menor medida con sus dimensiones: peso y ancho máximo. [Loewe et al. \(2016\)](#) estudiaron la productividad de las poblaciones de *Pinus pinea* L. a lo largo de la gradiente climática de Chile, específicamente desde las regiones de Coquimbo a la Araucanía. Los resultados de esta investigación determinaron que mientras más al sur, la productividad del pino piñonero iba en aumento (tanto en peso de piñas como el número de piñas por árbol), esto gracias al efecto del aumento de precipitaciones, como también las temperaturas medias en estados específicos del ciclo reproductivo de este. Contemplando que el ciclo productivo es de 3,5 años, es de esperar que, en zonas diferentes, por la variabilidad de condiciones que se pueden presentar en estas zonas, las semillas presenten características morfológicas variables, siendo interesante del punto de vista de la apertura mecánica que, una de las características más afectadas sea la resistencia a la ruptura de las semillas.

- *Firmeza según distintos contenidos de humedad de la cáscara*

Efectivamente, existe una disminución de la resistencia al rompimiento de las semillas mientras mayor tiempo hayan permanecido en agua. En relación con los restos de cáscara, visualmente no se observó grandes diferencias en los fragmentos, siendo la única diferencia, en el caso de las semillas secas, la presencia de fragmentos levemente más grandes, lo cual es importante evaluar para la determinación del proceso de rompimiento, y la determinación del tamaño de harneros correctos al utilizar semilla humedecida.

[Özgüven & Vursavus \(2004\)](#) hacen referencia a la falta de información que existe sobre las propiedades físicas y mecánicas del piñón, y realizan pruebas de resistencia a la ruptura, pero manteniendo una humedad constante. [Gharibzahedi et al. \(2010\)](#) comprobaron que frente al aumento del contenido de humedad la semilla de *Pinus pinea* existe un aumento de la longitud, el ancho, el espesor y el diámetro geométrico. Se determinó que existe una disminución lineal entre la fuerza de ruptura con respecto al aumento del contenido de humedad en la semilla de piñón ([Cárcel et al., 2011](#)). Estas condiciones de relación física entre los contenidos de humedad de la semilla fueron fundamentales en el presente estudio para mejorar el proceso de rompimiento y disminuir mermas en la producción.

- *Rompimiento.*

Se determinó que mojar las semillas disminuye de forma importante el porcentaje de piñones pelados dañados. Es importante destacar que los piñones provenientes de las semillas que fueron remojadas presentaban en su mayoría un daño físico por el aplastamiento de la propia cascara, no así los piñones provenientes de semillas secas, que presentaban el fraccionamiento del piñón. Por lo mismo, podría existir una disminución de piñón dañado en el caso de semilla húmeda, presentando una mejor calibración en el espacio de los rodillos de la máquina rompedora. [Cárcel et al. \(2011\)](#) se refiere a la necesidad de generar

una humedad adecuada para el proceso de agrietamiento o rompimiento de la cáscara, ya que, al tener una humedad muy baja, el piñón será más propenso a romperse en el proceso, lo que afectará su comercialización.

CONCLUSIONES

Las máquinas disponibles para los procesos de postcosecha de piñón de pino no especifican la especie para la cual fueron diseñadas. Por ello, la identificación de los puntos críticos observados en estas evaluaciones permite adaptar dichas máquinas para optimizar los procesos de postcosecha del piñón de *Pinus pinea* minimizando sus pérdidas de semillas en el rompimiento de piñas a solo un 0,8%, una correcta clasificación de las semillas en tres grupos, y por último, la obtención de un 83% de piñones sin daños.

Durante el análisis, se identificó varios problemas que impedían el correcto funcionamiento de las máquinas, afectando la obtención del producto con las características deseadas. Se implementaron modificaciones para resolver estos inconvenientes, y las evaluaciones realizadas validaron las mejoras aplicadas a las máquinas de procesamiento del piñón mediterráneo.

Además, la caracterización de las semillas de *Pinus pinea* y sus condiciones de preparación para el proceso de rompimiento, mediante diferentes métodos de humedecimiento, resulta relevante debido a la escasez de estudios sobre la morfología y propiedades físicas de estas semillas. Esta información es clave para optimizar los procesos de obtención del piñón mediterráneo en condiciones aptas para su comercialización.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico, por el apoyo a la ejecución del proyecto FONDEF (ID22110034) "Aprovechamiento Comercial del Fruto del Pino Piñonero (*Pinus pinea* L.) en Chile: Validación de Tecnologías para la Obtención de Piñones", en cuyo marco se generó esta publicación. Además, a Rodrigo del Río por su apoyo en estadística y figuras 9 y 10.

REFERENCIAS

- Avila, A., Delard, C. & Loewe-Muñoz, V. (2020). Zonas potenciales para el cultivo de Pino piñonero (*Pinus pinea* L.) en Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 26(3): 51–64. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.537>
- Cárcel, L., Bon, J., Acuña, L., Nevares, I., del Álamo, M. & Crespo, R. (2011). Moisture dependence on mechanical properties of pine nuts from *Pinus pinea* L. *Journal of Food Engineering*, 110(2): 294–297. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.04.018>
- Cervantes, M., Rodríguez, G., Enríquez, J. & Rodríguez, M. (2023). Caracterización morfológica de semillas y eficiencia germinativa de *Pinus patula* var. *longepedunculata* y *P. pseudostrobus* var. *Oaxacana*. *E-CUCBA*, 10(20): 44–51. <https://doi.org/10.32870/ecucba.vi20.295>
- Gharibzahedi, S.M.T., Etemad, V., Mirarab-Razi, J. & Fos'hat, M. (2010). Study on some engineering attributes of pine nut (*Pinus pinea*) to the design of processing equipment. *Res. Agr. Eng.*, 56: 99–106. <https://doi.org/10.17221/49/2009-RAE>
- Greene, D. & Johnson, E. (1993). Seed Mass and Dispersal Capacity in Wind-Dispersed Diaspores. *Oikos*, 67(1): 69–74. <https://doi.org/10.2307/3545096>
- González, M. & Loewe, V. (2012). Elaboración del piñón. En: Loewe, V. & Delard, C. (Eds.). *Un nuevo cultivo para Chile. El Pino piñonero (Pinus pinea L.)*. INFOR. Santiago. Pp: 104–118. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/20299>

- González, M.V. (2014).** Cosecha de pino piñonero (*Pinus pinea* L.). Antecedentes generales y experiencia en Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 20(1): 51–68. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2014.415>
- Loewe, V. & Delard, C. (Eds). (2016).** Producción de piñón mediterráneo (*Pinus pinea* L.). Manual N°48. Instituto Forestal. Chile. 108 p.
- Loewe, V.; Balzarini, M.; Álvarez-Contreras, A.; Delard-Rodríguez, C. & Navarro-Cerrillo, R. (2016).** Fruit productivity of Stone pine (*Pinus pinea* L.) along a climatic gradient in Chile, *Agricultural and Forest Meteorology*, N° 223. Pp: 203-216. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.011>.
- Loewe, V., Bonomelli, C., Delard, C., Del Río, R., & Balzarini, M. (2025).** Effect of Fertilization on the Performance of Adult *Pinus pinea* Trees. *Biology*, 14(2): 216. <https://doi.org/10.3390/biology14020216>
- Özgüven, F. & Vursavuş, K. (2004).** Some physical, mechanical and aerodynamic properties of pine (*Pinus pinea*) nuts. *Journal of Food Engineering*, 68(2): 191-196. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.031>
- Zhang, M., Su, C. & Lu, C. (2020).** Cone's structure and seed traits of four species of large-seeded pines: Adaptation to animal-mediated dispersal. *Ecology and Evolution*, 10(12): 5293–5301. <https://doi.org/10.1002/ece3.6273>



ARTÍCULO

Sistemas agroforestales y obras de conservación de suelo potencian la captura de carbono en ecosistemas xerofíticos de Coquimbo.

Marcelo Rosas Cerda¹ , Jaime Montenegro Rojas¹ & Sergio Silva Soto¹ 

¹Instituto Forestal, sede Diaguítas. La Serena, Chile. mrosas@infor.cl; jmontene@infor.cl; ssilva@infor.cl

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.628>

Recibido: 14.04.2025; Aceptado: 30.04.2025.

RESUMEN

Este estudio evalúa el impacto de las obras de conservación de agua y suelo (OCAS) combinadas con agroforestería en la recuperación de suelos y ecosistemas degradados en el matorral xerofítico de la Comuna de Canela, Región de Coquimbo. Se comparó la reserva de carbono integrada en la biomasa aérea y subterránea entre dos sitios vecinos con suelos degradados: uno tratado con OCAS y agroforestería hace seis años y otro sin intervención. Se midió el diámetro basal, el diámetro de copa y la altura de todos los arbustos en ambos sitios. La biomasa aérea se estimó utilizando modelos generales para árboles pequeños y arbustos ramificados desde la base, mientras que la biomasa subterránea se calculó con un modelo general para arbustos y como porcentaje de la biomasa aérea para los arbustos pequeños.

Los resultados indican que el tratamiento de OCAS y agroforestería incrementa significativamente la biomasa, con una estimación de 2,54 veces más biomasa que en el sitio sin tratamiento. Las especies plantadas mostraron una contribución 1,8 veces mayor a la biomasa que los arbustos silvestres. El contenido de carbono en biomasa aérea y subterránea fue de 0,37 t C/ha en el sitio tratado y 0,21 t C/ha en el sitio control, cifras comparables a estudios realizados en Chile y Senegal. Estos resultados subrayan la importancia de las zonas áridas como sumideros de carbono y su potencial contribución a la mitigación del cambio climático.

Palabras clave: Captura de carbono, Formaciones xerofíticas, OCAS.

SUMMARY

This study evaluates the impact of water and soil conservation practices (OCAS) combined with agroforestry on the recovery of degraded soils and ecosystems in the xerophytic scrubland of the Canela Commune, Coquimbo Region. The carbon stock integrated in aboveground and belowground biomass was compared between two neighboring sites with degraded soils: one treated with OCAS and agroforestry six years ago and the other without intervention. Basal diameter, crown diameter and height of all shrubs were measured at both sites. Aboveground biomass was estimated using general models for small trees and shrubs branched from the base, while belowground biomass was calculated using a general model for shrubs and as a percentage of aboveground biomass for small shrubs.

The results indicate that the OCAS and agroforestry treatment significantly increased biomass, with an estimated 2.54 times more biomass than the untreated site. Forested species showed a 1.8 times greater contribution to biomass than wild shrubs. The aboveground and belowground biomass carbon content was 0.37 t C/ha in the treated site and 0.21 t C/ha in the control site, figures comparable to studies conducted in Chile and Senegal. These results underline the importance of drylands as carbon sinks and their potential contribution to climate change mitigation.

Key words: Carbon sequestration, Xerophytic formations, water and soil conservation practices.



INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres, específicamente los ecosistemas forestales y los ecosistemas de zonas áridas, desempeñan un papel crucial como sumideros naturales de carbono. Los bosques y el matorral, mediante el proceso de fotosíntesis, capturan y almacenan grandes cantidades de CO₂ en la biomasa y el suelo, lo que contribuye significativamente a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, la disminución global de estas reservas, atribuida principalmente a la deforestación y el cambio de uso del suelo, subraya la necesidad de implementar medidas efectivas para su conservación y restauración. Cada año, en promedio, los sumideros de carbono terrestres y oceánicos capturan aproximadamente la mitad de las emisiones globales derivadas del uso de combustibles fósiles. Esto ocurre incluso considerando la creciente tendencia al alza de dichas emisiones, lo que sugiere que la capacidad de absorción de carbono mediante la fotosíntesis ha logrado mantenerse en un ritmo comparable al incremento en las emisiones, proporcionando así un servicio ecosistémico crítico que frena el aumento de la concentración de CO₂ atmosférico (Poulter *et al.*, 2014).

El dióxido de carbono (CO₂) atmosférico exhibe una notable variabilidad en escalas de tiempo interanuales. En 2011 se registró un sumidero de carbono terrestre sin precedentes impulsado de manera inesperada por el crecimiento de la vegetación en regiones semiáridas del hemisferio sur y casi el 60% de la absorción de carbono responsable de esta anomalía se atribuyó a los ecosistemas semiáridos de Australia, donde las condiciones climáticas asociadas al fenómeno de La Niña provocaron hasta seis estaciones consecutivas de aumento de las precipitaciones (Poulter *et al.*, 2014). Este hallazgo subraya la relevancia global de los ecosistemas de zonas áridas, dominados principalmente por árboles con múltiples troncos y especies arbustivas del matorral xerofítico, como reservas clave de carbono y como actores significativos en la captura de carbono atmosférico. En contraste, los bosques tropicales podrían desempeñar un papel menos dominante en esta función en el futuro.

Las zonas áridas del planeta, consideradas entre las más sensibles al cambio climático y a las actividades humanas, están experimentando una rápida expansión como consecuencia del calentamiento global. Nuevas proyecciones sugieren que, de mantenerse esta tendencia, las zonas áridas podrían llegar a cubrir la mitad de la superficie terrestre mundial para finales del siglo XXI (Huang *et al.*, 2016). El matorral xerofítico tiene un rol relevante en la función de captura de carbono atmosférico, por lo que mejorar la evaluación del sumidero de carbono de la vegetación de zonas semiáridas es de importancia mundial, ya que la gran variabilidad interanual característica del sumidero de vegetación mundial se debe en gran parte a la variabilidad en la captura de carbono de los ecosistemas semiáridos, de Australia principalmente (Poulter *et al.*, 2014).

La Ley Marco de Cambio Climático (LMCC), promulgada en junio de 2022 (MMA, 2022), busca institucionalizar la visión del Estado al establecer como objetivo legal la meta de alcanzar la Carbono Neutralidad. Esta normativa tiene como propósito alcanzar la neutralidad de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mediante la adopción de un enfoque científico que fortalece las políticas públicas, utilizando la mejor información científica disponible para fundamentar la toma de decisiones. La LMCC busca proponer medidas eficaces para la adaptación al cambio climático, priorizando la reducción de costos económicos, ambientales y sociales. Asimismo, incorpora un enfoque ecosistémico que resguarda la estructura y función de los ecosistemas incorporando las soluciones basadas en la naturaleza como eje central de su implementación.

Este estudio se alinea con la estrategia climática de largo plazo de la Ley Marco de Cambio Climático, al desarrollar metodologías y generar datos precisos relacionados con la captura de carbono y la restauración de suelos, proporcionando herramientas cuantitativas que contribuyen a la evaluación de medidas de mitigación. Para comprender el funcionamiento del ecosistema y su potencial para mitigar el cambio climático a través del secuestro de carbono en la biomasa, es fundamental realizar una cuantificación precisa de la biomasa aérea y subterránea de la vegetación leñosa, usando modelos de estimación de biomasa basado en variables alométricas adecuadas para plantas leñosas multitallo y arbustos ramificados desde la base, que es la morfología dominante en las formaciones xerofíticas.

El Instituto Forestal (INFOR) ha implementado, durante los últimos 25 años, un conjunto de Obras de Conservación de Agua y Suelo (OCAS) en la zona centro-norte de Chile, incluyendo la Región de Coquimbo. Estas intervenciones, orientadas a la cosecha de aguas lluvias y su infiltración en el suelo, se combinan con sistemas agroforestales que integran especies arbóreas nativas, contribuyendo a mejorar la disponibilidad hídrica. La aplicación de esta estrategia combinada ha demostrado beneficios significativos, entre ellos, el incremento en el crecimiento de las plantas, la mejora de las propiedades del suelo (Hernández *et al.*, 2020), el aumento de la biodiversidad y el fortalecimiento de la resiliencia de los ecosistemas (Silva *et al.*, 2021). Además, la mayor biomasa generada por estos tratamientos, tanto en la vegetación natural como en las plantas asociadas a la actividad agroforestal, incrementa la absorción de CO₂, reforzando el secuestro de carbono atmosférico.

El desafío actual consiste en cuantificar la biomasa mediante modelos de mejor ajuste y comparar el aporte diferencial de las reservas de carbono entre áreas degradadas y sitios intervenidos con tratamientos de recuperación basados en OCAS y agroforestería para mitigar la degradación de suelos. Esta información permitirá una comprensión más documentada de la contribución de nuestra metodología y su impacto en la adaptación al cambio climático.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del uso de Obras de Conservación de Agua y Suelo (OCAS) y agroforestería sobre la capacidad de almacenamiento de Carbono en un ecosistema degradado en el matorral xerofítico en el secano de Canela en la Región de Coquimbo. Mediante un enfoque que integra que tanto la biomasa aérea como la subterránea, esta investigación busca generar información fundamental para optimizar estrategias de manejo sostenible en ecosistemas xerofíticos, contribuyendo así al cumplimiento de los objetivos de carbono neutralidad establecidos por Chile para el año 2050.

MATERIAL Y MÉTODOS

Nuestra metodología consideró comparar dos áreas muy cercanas, donde una recibió el tratamiento de instalación de OCAS y agroforestería el año 2017 (Hernández *et al.*, 2020) y la otra mantuvo las condiciones de suelo y vegetación sin acciones de protección. Esta última fue usada como control sin tratamiento.

Ensayo

El ensayo está ubicado en la Región de Coquimbo, provincia de Choapa, comuna de Canela, localidad de Carquindaño (-31.4819°, -71.4124°), en un sector con pendiente suave, de exposición norte y alta degradación de suelo y vegetación a causa del uso histórico no sostenible de extracción de leña y el cultivo de cereales y arado, en los pocos años con precipitaciones (**Figura 1**). De acuerdo con su capacidad de uso (Minagri, 2010) es suelo de secano, que correspondió al grupo terrenos arables Clase 4 con alta susceptibilidad a la erosión, uso limitado a cultivos ocasionales de cereales y pastos de bajos cuidados y bajo rendimiento, suelo delgado de baja fertilidad. Actualmente, a causa de la pérdida del suelo causado por arado y erosión por escorrentía superficial, corresponde al grupo de terrenos no arables Clase 5 con limitaciones que impiden el cultivo y que corresponden a la delgadez del suelo, la escasa fertilidad y el factor climático de aridez y que pueden ser resueltas usando técnicas adecuadas (Minagri, 2010).

El área de estudio está incluida en el régimen agroclimático de estepa con influencia marina con régimen de humedad árido (AGRIMED, 2017) y en la formación vegetacional del piso de matorral desértico mediterráneo interior de *Flourensia thurifera* y *Colliguaja odorifera* (Luebert & Plissock, 2006).

El sitio con tratamiento de conservación de suelo, con obras de OCAS que incluyen surcos en media luna, limanes y zanjas de infiltración, donde se incluyó la agroforestería con establecimiento de plantas introducidas de rápido crecimiento y especies nativas (Silva *et al.*, 2021), es de 1,45 hectáreas y está cercado. El sitio control está ubicado 100 metros al este, en las mismas condiciones de exposición, pendiente e historia de uso, no está cercado, es de 1,72 ha y no recibió ningún tipo de tratamiento de conservación de suelo.





Figura 1. Ubicación de Unidad en la Región de Coquimbo, provincia de Choapa, comuna de Canela, localidad de Carquindaño

Ecuaciones Alométricas para Biomasa Vegetal

En ambos sitios se registró todas las especies leñosas presentes. Para enfrentar las diferentes fisonomías del desarrollo leñoso que se presentan en las formaciones xerofíticas, se consideró tres fisonomías tipo: (i) arbustos o árboles pequeños de tallo único o principal; (ii) arbustos altos de tallos múltiples; y (iii) arbustos medianos o bajos muy ramificados desde la base. En todas las plantas se registró la especie, su origen (silvestre o plantada), la altura (altura máxima) y el diámetro de copa, tomado en el eje mayor y un eje perpendicular. En los arbolitos de tallo único se midió el diámetro a la altura del cuello DAC (10 cm.). En los arbustos altos de tallos múltiples se midió el diámetro a la altura del cuello de todas las ramas, se calculó el área de cada rama y las áreas se sumaron para integrar un valor de DAC. En los arbustos bajos ramificados desde la base solo se registró el diámetro de copas y la altura.

La cuantificación de la biomasa de los arbustos fue obtenida usando modelos alométricos normalizados multiespecies para árboles bajos y arbustos (Conti *et al.*, 2018), esto porque los modelos alométricos para formaciones xerofíticas, compuestos principalmente por arbusto y árboles bajos de tallos múltiples, son mucho menos comunes que los de bosques, probablemente porque tienen menor valor económico como madera y tienden a no estar representados en los inventarios forestales. Dependiendo de las variables alométricas se puede muestrear con mayor precisión a nivel individual, se usó dos modelos generales de biomasa aérea. Para los arbustos bajos y árboles pequeños donde se pudo medir el diámetro basal, se usó un modelo con tres variables, diámetro basal, altura y diámetro de copa. Para arbustos bajos ramificados desde la base donde es imposible la medición precisa del diámetro basal, se aplicó un modelo con dos variables, diámetro de copa y altura (Conti *et al.*, 2019). Las ecuaciones y sus parámetros, apoyadas por esquema de la fisonomía de cada modelo se entregan en el diagrama de la **Figura 2**. Para revisar el ajuste del modelo a los datos, se midió el peso seco de 12 individuos, diez de *Gutierrezia resinosa* y dos de *Haplopappus cerberoanus*, donde la dispersión de los datos es $\pm 0,0055$, lo que se considera un muy buen ajuste.

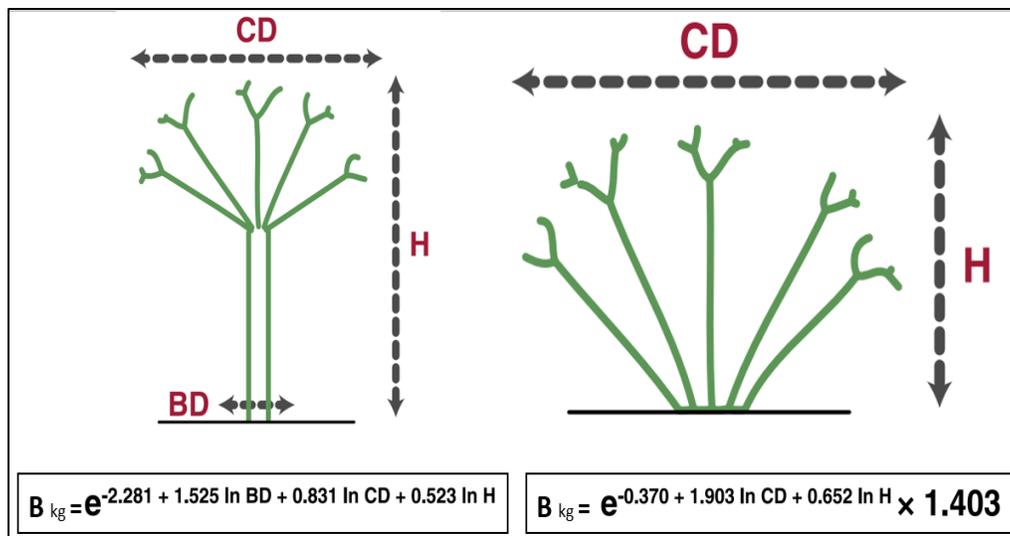


Figura 2. Esquema de fisonomías identificadas en el estudio, parámetros medidos y asignación a modelos generales de estimación de biomasa aérea. Arriba: fisonomías y parámetros, CD = diámetro de copa; H = altura; BD = diámetro de cuello (10cm). Abajo Modelos usados en cada fisonomía. (Redibujado de Conti *et al.*, 2019).

Para obtener una cuantificación precisa de la biomasa total de las plantas, también se estimó la biomasa subterránea, usando un modelo general de alta eficiencia, desarrollado para arbustos y árboles esclerófilos (Paul *et al.*, 2019). Este modelo fue contrastado con mediciones directas de la biomasa total subterránea a nivel de rodal, obtenidas mediante excavación de las parcelas muestreadas. Se usó el modelo “FShrub&Ac”, cuya forma de crecimiento fisionómico corresponde con arbustos y árboles pequeños de tronco múltiple, para los cuales se pudo medir el diámetro basal. En la elaboración de este modelo se incorporó la especie *Acacia saligna*, que está presente en este estudio y otros arbustos de altura menor a dos metros, de fisonomía similar a los arbustos del ensayo de OCAS. En el caso de las plantas en las que no fue posible medir el diámetro basal con precisión, la biomasa subterránea fue estimada usando una relación entre raíz/tallo del 45% conforme a lo recomendado por Paul *et al.* (2019). Esta estimación fue validada con datos de peso de biomasa aérea y subterránea medidos en cuatro ejemplares de *Gutierrezia resinosa* y dos de *Haplopappus cerberianus*.

La expresión del modelo usado es la siguiente:

$$F_{Shrub\&Ac} = \exp[-3,553 + 2,185 \ln D_{10}] \times 1,160$$

Donde:

$F_{Shrub\&Ac}$ = Biomasa subterránea (Kg) para el modelo de arbustos
 $\ln D_{10}$ = logaritmo natural del diámetro del tronco a los 10 cm de altura

Para estimar la captura de carbono en la biomasa seca evaluada en el ensayo, se siguieron las Directrices del IPCC de 2006 (IPCC, 2006), que proponen un factor de 0,47 para el contenido de carbono en tierras forestales. Este mismo valor fue reportado para las zonas áridas del espinal en Argentina (Sione *et al.*, 2019). Luego, la conversión de la masa de carbono (C) a dióxido de carbono (CO₂) se basa en la relación entre las masas moleculares del C (12 g/mol) y CO₂ (44 g/mol) usando el factor 44/12 = 3,67.

Análisis Estadístico

El análisis estadístico fue ejecutado en lenguaje R (R Core Team, 2024). Los datos fueron almacenados en un formato de archivo .CSV, con 2654 filas que corresponden a los individuos, en tanto que las columnas son las variables medidas en cada uno de ellos (**Cuadro 1**). La variable dependiente es 'biomasa' (biomasa total peso seco en kilos) y las variables independientes son seis: (i) 'tratamiento' (OCAS vs control); (ii) 'silvestre' (planta silvestre vs planta establecida); (iii) 'especie' (nombre científico de la especie vegetal); (iv) 'altura' (altura de la planta en metros); (v) 'copa' (diámetro de la copa en metros) y (vi) 'área' (superficie de cada ensayo). Un paso previo fue la conversión de las variables categóricas 'tratamiento' y 'silvestre' que representan categorías discretas con solo dos valores, a factores para que el programa R las trate correctamente como categorías en lugar de valores numéricos continuos.

Cuadro 1. Estructura de los datos usados en el análisis, nombre de la variable, descripción de las variables, tipo de valores de cada variable y característica de variable.

Variable	Descripción	Tipo	Característica
Biomasa	Biomasa total peso seco kilos	continua	dependiente
Tratamiento	Tipo de tratamiento	discreta	independiente
Silvestre	Origen de la planta	caracteres	independiente
Especie	Nombre científico de la especie	continua	independiente
Altura	Altura de la planta	continua	independiente
Copa	Diámetro de la copa	continua	independiente
Área	Área del ensayo específico	continua	dependiente

- *Evaluar la normalidad de los datos*

Para determinar si los datos de biomasa pueden ser modelados mediante técnicas paramétricas que asumen normalidad, se evaluó la distribución de los datos utilizando la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965), ejecutada en R usando el paquete "stats" v. 4.4.2 incluido en R (R Core Team, 2024). Dado que los datos de biomasa silvestre suelen presentar sesgos en su distribución, por ejemplo, numerosos valores muy bajos y pocos valores extremadamente altos, la aplicación de esta prueba es fundamental para orientar los análisis posteriores. Además de la prueba de Shapiro-Wilk, se emplearon histogramas y gráficos de densidad para una evaluación visual de la distribución de los datos, permitiendo identificar patrones, sesgos y presencia de valores atípicos (Wilk & Gnanadesikan, 1968). Estos gráficos fueron generados usando el paquete "graphics", incluido en R (R Core Team, 2024).

- *Ajuste de modelos*

Para analizar la distribución de los datos de biomasa y conocer sus características e idoneidad para modelar distribuciones sesgadas y no normales, se evaluó los modelos de distribución Gamma y Weibull basados en el Criterio de Información de Akaike (AIC). El AIC es una medida que evalúa la calidad de un modelo en función de su ajuste a los datos y su complejidad. Un AIC más bajo indica un mejor equilibrio entre ajuste y simplicidad del modelo. El análisis se ejecutó con la función "fitdistr" del paquete "MASS" (Ripley & Venables, 2023).

- *Modelo lineal generalizado (GLM)*

Para evaluar el efecto del tratamiento sobre la biomasa de los arbustos se usó un Modelo Lineal Generalizado (GLM) (McCullagh & Nelder, 1989) usando la variable biomasa como respuesta y tratamiento (ocas o control) como la principal variable explicativa. Los datos de biomasa fueron estratificados en dos grupos, tratamiento y control, para evaluar el efecto específico del tratamiento y facilitar la identificación de diferencias significativas atribuibles al tratamiento (Fisher, 1935). Los GLM permiten modelar relaciones

entre variables dependientes e independientes, especialmente cuando las variables de respuesta no siguen una distribución normal. Se incluyó otras covariables como altura, diámetro de copas, planta silvestre o establecida, especie y área del ensayo para controlar sus efectos. El análisis se ejecutó con la función “glm” del paquete “stats”, incluido en R (R Core Team, 2024).

RESULTADOS

Datos

Un resumen estadístico de los datos de biomasa en el tratamiento y control se entrega en el **Cuadro 2**, y la distribución de los datos por cuartiles en cada tratamiento se entrega en el **Cuadro 3**.

Cuadro 2. Resumen estadístico de los datos de biomasa vegetal aérea y subterránea en cada tratamiento.

Estadística	Tratamiento	Control
Número de registros	224	2430
Valor mínimo kg	0,006	0,006
Valor máximo kg	143,608	43,415
Media kg	4,9609	0,3201
Mediana kg	0,4715	0,018
Biomasa por há kg	766,8	452,3
Número de especies	18	8
Especies agroforestería	11	0

Cuadro 3. Distribución de los datos de biomasa vegetal agrupado por cuartiles en cada tratamiento. La biomasa esta expresada en kilos. El primer cuartil indica el peso, donde el 25% de los arbustos tienen una biomasa igual o inferior a este valor. La mediana, es el valor central de la biomasa donde el 50% de los arbustos tienen una biomasa menor o igual a este valor. El tercer Cuartil, indica el peso donde el 75% de los arbustos tienen una biomasa igual o inferior a este valor.

Tratamiento	Mínimo	1°Cuartil	Mediana	Media	3°Cuartil	Máximo
OCAS	0,006	0,154	0,471	4,9609	2,1125	143,608
Control	0,006	0,013	0,018	0,3201	0,028	43,415

La distribución de los datos del aporte de cada especie en biomasa para cada tratamiento se presenta en las **Figura 3a** y **3b**.

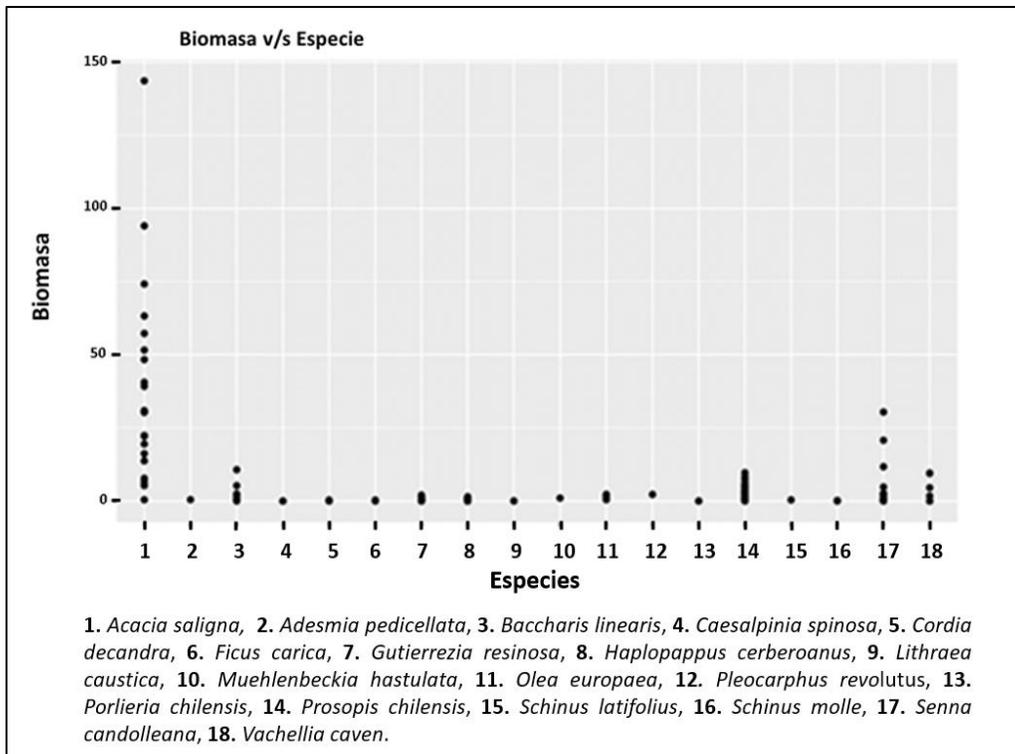


Figura 3a. Datos de biomasa separados por especie. en el sitio tratamiento de ocas y agroforestería.

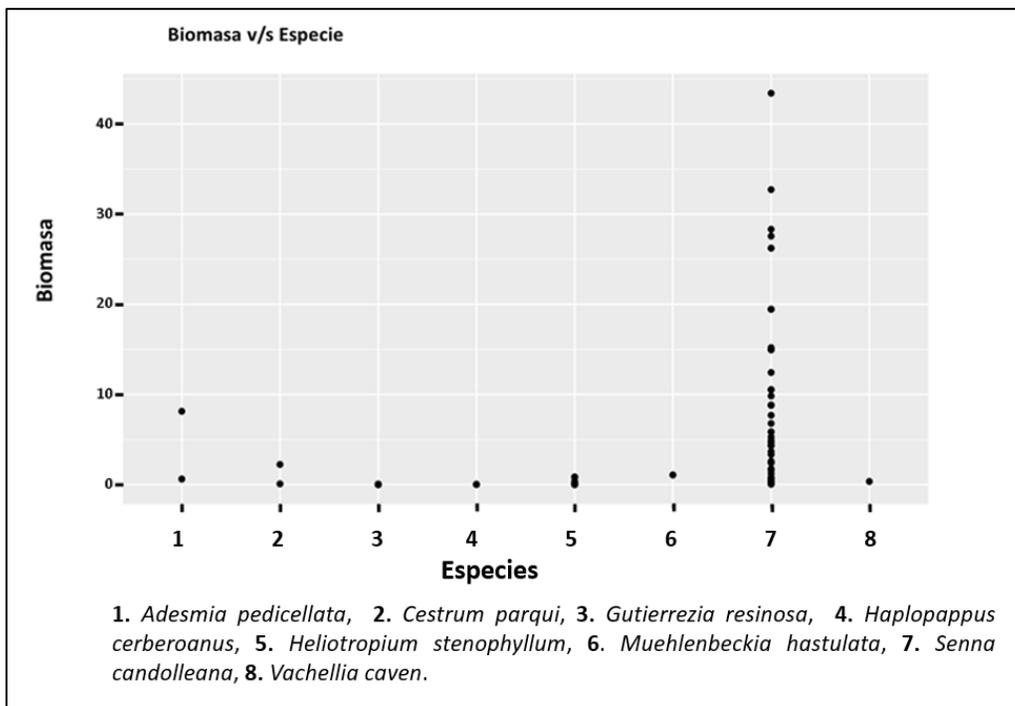


Figura 3b. Datos de biomasa separados por especie en el sitio control.



Biomasa Seca, Carbono y Equivalente de CO₂

Los datos de biomasa estimada, que incluyen tanto la biomasa aérea como la subterránea, expresados en kilogramos de biomasa seca por hectárea y desglosados por especie, se presentan en el **Cuadro 4**. En la segunda columna se muestra la biomasa seca por hectárea, en la tercera columna el contenido de carbono, calculado a partir del porcentaje de carbono de la biomasa, y en la cuarta columna se indica el equivalente en peso de dióxido de carbono (CO₂) inmovilizado por los arbustos. En el **Cuadro 5** se presentan los mismos datos correspondientes al sitio control.

Cuadro 4. Biomasa seca, carbono inmovilizado y equivalente de CO₂ atmosférico para cada especie en el sitio con OCAS.

Especie tratamiento	Biomasa (Kg seco/ha)	C (Kg/ha)	CO ₂ equivalente (Kg/ha)
<i>Acacia saligna</i>	564,1	265,1	973,1
<i>Prosopis chilensis</i>	71,7	33,7	123,7
<i>Senna candolleana</i>	60,1	28,2	103,6
<i>Baccharis linearis</i>	18,2	8,6	31,4
<i>Vachellia caven</i>	17,6	8,3	30,3
<i>Haplopappus cerberoanus</i>	13,9	6,5	24,0
<i>Gutierrezia resinosa</i>	10,5	4,9	18,1
<i>Olea europaea</i>	5,6	2,6	9,7
<i>Pleocarpus revolutus</i>	1,6	0,7	2,7
<i>Muehlenbeckia hastulata</i>	0,7	0,3	1,2
<i>Ficus carica</i>	0,5	0,2	0,8
<i>Cordia decandra</i>	0,4	0,2	0,6
<i>Adesmia pedicellata</i>	0,3	0,2	0,6
<i>Schinus latifolius</i>	0,3	0,1	0,5
<i>Schinus molle</i>	0,2	0,1	0,4
<i>Caesalpinia spinosa</i>	0,09	0,04	0,1
<i>Porlieria chilensis</i>	0,08	0,04	0,1
<i>Lithraea caustica</i>	0,07	0,04	0,1
Total	766,0	360,0	1321,3

Cuadro 5. Biomasa seca, carbono inmovilizado y equivalente de CO₂ atmosférico para cada especie en el sitio de control (Sin OCAS).

Especie control	Biomasa (Kg seco/ha)	C (Kg/ha)	CO ₂ equivalente (Kg/ha)
<i>Senna candolleana</i>	409,3	192,4	706,0
<i>Gutierrezia resinosa</i>	21,2	10,0	36,6
<i>Heliotropium stenophyllum</i>	13,3	6,2	22,9
<i>Adesmia pedicellata</i>	5,4	2,6	9,4
<i>Cestrum parqui</i>	1,3	0,6	2,3
<i>Muehlenbeckia hastulata</i>	1,2	0,6	2,1
<i>Vachellia caven</i>	0,2	0,09	0,3
<i>Haplopappus cerberoanus</i>	0,1	0,06	0,3
Total	452,1	212,5	779,9

Análisis Estadístico

- *Normalidad de los datos*

La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk entregó un valor de $W = 0,11713$, $p\text{-value} < 2,2 \times 10^{-16}$ indicando una fuerte desviación de la normalidad. En el estadístico W , los valores cercanos a 1 apoyan que la distribución es normal. El p -valor es extremadamente pequeño, mucho menor de 0,05, significa que hay evidencia muy fuerte para rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal. La distribución de los valores de biomasa por cuartiles, los gráficos de distribución de biomasa por tratamiento y el gráfico de diagrama de cajas reflejan claramente la distribución desplazada hacia los valores menores con muchos individuos y una brusca disminución hacia mayores pesos con pocos individuos (**Figura 3**).

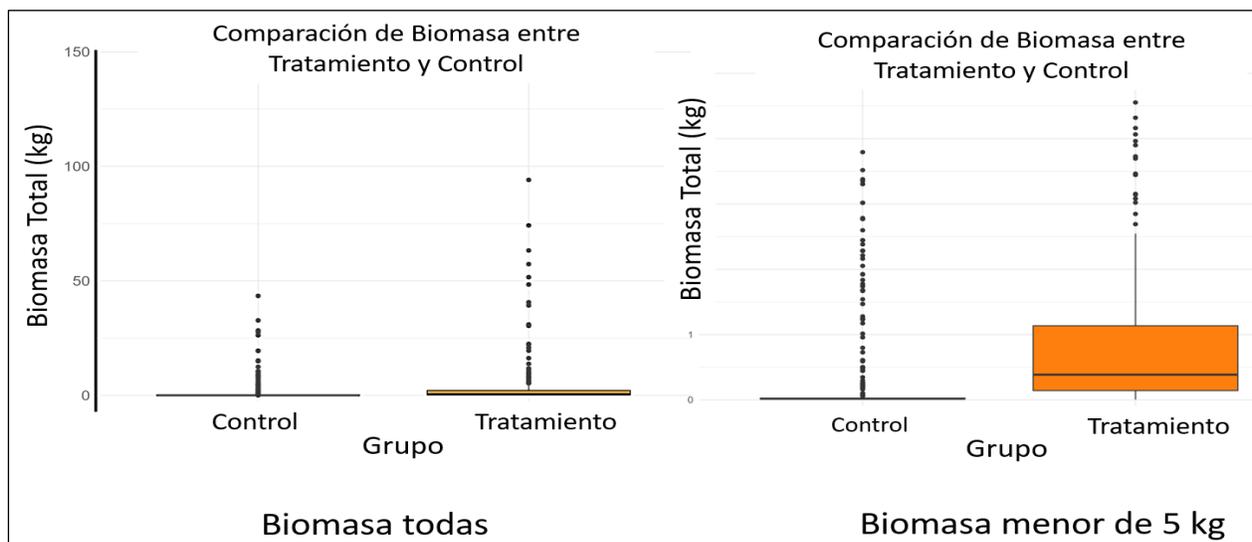


Figura 3. Gráfico de distribución de los datos de biomasa por tratamiento representado en diagrama de cajas. Izquierda: Incluye todos los individuos. Derecha: Muestra sólo los individuos con biomasa menor a 5 kilos que representa el 98% de los registros. Cada punto en el gráfico representa la biomasa de un solo individuo.

- *Ajuste de modelos*

La evaluación del ajuste de modelos basado en el Criterio de Información de Akaike es:

- AIC Gamma: -4632,61
- AIC Weibull: -6713,13

El modelo Weibull tiene un AIC significativamente más bajo (-6713,13) en comparación con el modelo Gamma (-4632,61). Esto sugiere que el modelo Weibull proporciona un mejor ajuste a los datos de biomasa que el modelo Gamma.

- *Modelo lineal generalizado (GLM)*

Los resultados del modelo lineal generalizado para evaluar el efecto del tratamiento control de la degradación del suelo y la vegetación sobre la biomasa de los arbustos, se presentan en el **Cuadro 5**. Las métricas entregadas son:

- Estimación, representa el coeficiente asociado a cada variable independiente, indica la dirección y magnitud del efecto de la variable sobre la biomasa (variable dependiente) en escala logarítmica. Los valores positivos indican que un aumento en la variable predictora se asocia con un incremento de la biomasa.
- Error estándar, mide la precisión de la estimación del coeficiente, un valor pequeño indica una estimación más precisa.
- t-value, entrega la relación entre la estimación y su error estándar. Un valor absoluto alto sugiere que la variable independiente tiene un efecto significativo sobre la biomasa.
- Valor P, muestra la probabilidad de obtener un valor observado bajo la hipótesis nula donde la variable no tiene efecto. Un valor de $p < 0.05$ indica que la variable independiente tiene un efecto estadísticamente significativo sobre la biomasa.

Cuadro 5. Resultados de los coeficientes evaluados en análisis de regresión con el modelo lineal generalizado (GLM) utilizando una distribución Gamma con un enlace logarítmico. Se entrega cuatro métricas para las variables intercepto, tratamiento, altura de la planta, diámetro de copas y origen.

Variable	Estimación	Error estándar	t-value	Pr(> t)
Intercepto	-5,31254	0,10133	-52,429	<2e-16
Tratamiento	0,93328	0,05285	17,658	<2e-16
Altura	0,88199	0,07915	11,144	<2e-16
Diámetro de copas	3,24939	0,05747	56,537	<2e-16
Origen plantación	0,58808	0,09647	6,096	1,25E-09

El intercepto entrega un valor estimado de -5,312 que representa el logaritmo de la biomasa esperada cuando todas las variables independientes son cero. En kilos corresponde a 0,0049 (4,9 gramos).

El tratamiento OCAS y agroforestería comparado con el control, tiene un efecto positivo y significativo sobre la biomasa. La biomasa esperada con el tratamiento OCAS es 2,542 veces mayor que en el sitio control, indicando que el tratamiento OCAS tiene un efecto en el aumento de la biomasa.

La altura de la planta y el diámetro de copas con coeficientes positivos y significativos indican la importancia de estas variables sobre la biomasa. Un incremento de un metro de altura está asociado con 2,415 veces más biomasa. El diámetro de copas está asociado a un efecto mayor sobre la biomasa, donde un incremento de un metro adicional del diámetro de copas está asociado con un aumento de 25,778 veces más biomasa.

Las plantas establecidas en la intervención de OCAS y agroforestería tienen un efecto positivo y significativo sobre la biomasa y aportan 1,801 veces más biomasa que los arbustos silvestres.

Captura de Carbono

El carbono total de la biomasa vegetal en el sitio con OCAS fue de 0,37 t C/ha, a este valor contribuyen principalmente las especies *Acacia saligna* con 0,27 t C/ha, *Prosopis chilensis* con 0,03 t C/ha y *Senna candolleana* con 0,03 t C/ha. Las otras 15 especies presentes aportan 0,03 t/ha. El equivalente en CO₂ atmosférico inmovilizado por el sitio con tratamiento es de 1,32 t CO₂ /ha.

En el sitio control, el Carbono total fue de 0,21 t C/ha, cuyo aporte estuvo compuesto por *Senna candolleana* con 0,19 t C/ha y *Gutierrezia resinosa* con 0,01 t C/ha. Las otras seis especies presentes solo aportan 0,01 t C/ha. El equivalente en CO₂ atmosférico inmovilizado por el sitio control es de 0,78 t CO₂ /ha

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio demuestran el efecto positivo y significativo del tratamiento de OCAS y agroforestería sobre la capacidad de secuestro de carbono en un ecosistema degradado en el matorral xerofítico de la Región de Coquimbo.

La selección de modelos generales para la estimación de la biomasa en lugar de funciones alométricas por especies se justifica por la escasa disponibilidad de funciones para las especies en las condiciones locales (formaciones xerofíticas). También, las funciones alométricas disponibles entregaron numerosos valores negativos de biomasa vegetal para nuestras especies.

La biomasa de los arbustos muestra una distribución altamente sesgada, con muchos valores bajos y unos pocos valores extremadamente altos. Esta distribución parece reflejar una importante variabilidad en la recuperación de la vegetación, donde algunas especies han prosperado considerablemente más que otras, debido principalmente a sus estrategias intrínsecas de crecimiento como por ejemplo *Acacia saligna*, una de las especies de crecimiento rápido que fueron establecidas. La falta de normalidad de los datos de biomasa en el proceso de recuperación en áreas que han sufrido una larga historia de degradación también refleja, en los valores extremos de menor peso, las dificultades de la mayoría de las especies para prosperar en suelos y ecosistemas degradados y donde al mismo tiempo prosperan especies colonizadoras de alta producción de semillas y de alto establecimiento de plántulas, como el caso de las especies nativas silvestres *Haplopappus cerberuanus* y *Gutierrezia resinosa*. Los resultados sugieren que el ecosistema aún está en una fase temprana de recuperación, donde ciertas especies comienzan a dominar mientras otras aún están rezagadas, hecho que evidencia la complejidad y la variabilidad inherente en la restauración de ecosistemas degradados. Los valores atípicos de alto peso podrían representar respuestas excepcionales propias de algunas especies. Los resultados de este estudio refuerzan la idea de que las intervenciones deben ser monitoreadas y adaptadas con el tiempo para mejorar la eficacia en los programas de restauración del ecosistema.

El análisis de ajuste de modelos sugiere que la distribución de la biomasa de los arbustos en los sitios es más consistente con una distribución Weibull. Esta distribución es común en datos que tienen una distribución sesgada con una cola derecha más larga, lo que implica que hay muchas observaciones pequeñas y unas pocas muy grandes, lo que coincide con los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk. Este patrón de distribución puede reflejar la naturaleza del proceso de recuperación ecológica, donde la presencia de muchos arbustos pequeños puede indicar que la mayoría de las plantas aún están en etapas tempranas de crecimiento con tallas menores, mientras que unas pocas han crecido mucho, posiblemente debido a características propias de especies de crecimiento rápido que fueron plantadas (ej. *Acacia saligna*) y unos pocos individuos silvestres de arbustos de gran tamaño sobrevivientes en el proceso de degradación (ej. *Senna candolleana*). El modelo Weibull para describir la biomasa puede ayudar a enfocar las estrategias para el monitoreo de la recuperación, donde las especies que muestran alto crecimiento están siendo favorecidas por el tratamiento, mientras que otras podrían necesitar más atención, para el éxito del proceso de restauración.

La evaluación del efecto del tratamiento OCAS y agroforestería sobre la biomasa mediante el Modelo Lineal Generalizado (GLM), evidenció la efectividad de estas tecnologías sobre el crecimiento de los arbustos y el secuestro de carbono del matorral. El resultado significativo del tratamiento OCAS-agroforestería sugiere que este método de restauración ha sido exitoso en aumentar la biomasa de los arbustos, que, a su vez, es un indicador de la recuperación de suelos y ecosistemas degradados. El incremento de la biomasa refleja una mejor capacidad del suelo para sustentar vegetación, lo que contribuye a la estabilidad del ecosistema. El tratamiento aumenta la biomasa en un factor de 2,54 veces en comparación con el control sin OCAS, resaltando el efecto del tratamiento sobre el aumento de biomasa y captura de carbono asociada.

La correlación de variables en el GLM, muestra que el incremento de la biomasa está asociado a componentes estructurales de la fisionomía de los arbustos como la altura y el diámetro de la copa, que son indicadores importantes del vigor y salud de las plantas. Los resultados muestran que el tratamiento

ha promovido un crecimiento más robusto, esencial para la restauración de la cobertura vegetal y la reducción de la erosión del suelo.

El contenido de carbono por hectárea en biomasa aérea y subterránea fue de 0,37 t C/ha en el sitio con tratamiento OCAS-agroforestería y de 0,21 t C/ha en el sitio control (muy degradado), estos son comparables a los valores obtenidos en Chile en el matorral xerofítico moderadamente degradado ubicado en Las Cardas, Región de Coquimbo (Pérez *et al.*, 2011) de 3,7 t C/ha y de 0,82 t C/ha en condiciones degradadas con reforestación. Valores similares han sido reportados para el matorral xerofítico en un gradiente de degradación en el Desierto del Sahel en Senegal (Woomer *et al.*, 2004) desde praderas degradadas, praderas con arbustos aislados, matorral abierto de arbustos aislados, matorral y matorral con árboles aislados (porcentaje de cobertura = 0,8; 4,5; 6,0; 15,9 y 27,7% respectivamente) con valores para el carbono incluido en la biomasa aérea y subterránea de arbustos de 0,42; 0,91; 3,07; 1,98 y 6,54 t C/ha respectivamente.

Los estudios de biomasa y del carbono inmovilizado asociado a la vegetación leñosa, expresado en toneladas por hectárea, garantizan su consideración como indicador de la calidad de la tierra y estado del carbono (Woomer *et al.*, 2004). La resiliencia del sistema está determinada por su biomasa y carbono del suelo, y cuando este indicador disminuye es una expresión de la desertificación, condición que genera crisis humanitarias que lamentablemente son cada vez más frecuentes (Squires *et al.*, 1995).

La relevancia global de los ecosistemas de zonas áridas, y en particular de las formaciones xerofíticas, también se expresa en su capacidad como reservorios significativos de carbono y en su potencial para la captura de carbono atmosférico (Woomer *et al.*, 2004). Debido a su vasta extensión y baja densidad poblacional, las zonas áridas representan una oportunidad crucial para la compensación de carbono (Ojima *et al.*, 1993), con estimaciones de secuestro de carbono que varían entre 0,1 y 1,0 t C/ha/año (Lal, 2002). La gestión efectiva de estas regiones como sumideros de carbono debe contemplar la restauración de tierras desertificadas y la promoción de la biomasa leñosa perenne como estrategias clave (Lal, 2002).

CONCLUSIONES

Los resultados confirman la efectividad del tratamiento de OCAS y agroforestería en la recuperación de suelos y vegetación en ecosistemas xerofíticos degradados. La aplicación de este tratamiento ha demostrado ser un método exitoso para mejorar la biodiversidad, condiciones del suelo y biomasa de los arbustos, aumentando significativamente la capacidad de secuestro de carbono (Hernández *et al.*, 2020; Silva *et al.* 2021)

Las especies plantadas, como *Acacia saligna*, y las especies silvestres, como *Senna candolleana* o colonizadoras, como *Haplopappus cerberoanus* y *Gutierrezia resinosa*, desempeñan un papel crucial en la restauración del ecosistema. Estas especies actuarían como núcleos de regeneración, facilitando la recuperación de la vegetación y proporcionando un soporte estructural para la sucesión ecológica en un entorno degradado.

El incremento en la biomasa de las formaciones xerofíticas, potenciado en este caso por la implementación de modelos agroforestales y OCAS como herramienta tecnológica para la recuperación de la degradación, resalta la capacidad de estos ecosistemas para almacenar carbono. La presencia de arbustos de mayor tamaño y la mejora en la biomasa reflejan una recuperación progresiva del suelo, aumentando la importancia de las formaciones xerofíticas como reservorios de carbono en estrategias de mitigación del cambio climático

En este estudio se entregan los datos que validan la implementación de estas tecnologías como un procedimiento adecuado para la recuperación de suelos y vegetación para áreas degradadas. Los datos destacan el aporte de las especies establecidas, la singularidad de *Acacia saligna* y de especies silvestres, como núcleos de restauración y de conservación. La implementación de modelos agroforestales y OCAS contribuye a la conservación del entorno natural, la biodiversidad y el secuestro de carbono. Por ello, estas



prácticas son fundamentales para asegurar un futuro sostenible y resiliente en el ámbito silvoagropecuario, además de servir como herramientas clave para la adaptación al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al programa de investigación “Monitoreo de obras de conservación de agua y suelo (OCAS) en Cuencas de Ecosistemas Áridos y Semiáridos del Centro - Norte de Chile”, ejecutado por el Instituto Forestal (INFOR) durante los años 2019-2025, con el apoyo del Ministerio de Agricultura (MINAGRI) y en colaboración con la Comunidad Agrícola de Carquindaño.

REFERENCIAS

- AGRIMED. (2017).** Atlas Agroclimático de Chile. Estado actual y tendencias del clima, Tomo II. Regiones de Atacama y Coquimbo. 182.
- Conti, G., Gorné, L. D., Zeballos, S.R., Lipoma, M.L., Gatica, G., Kowaljow, E., Whitworth-Hulse, J.I. et al. (2019).** Developing allometric models to predict the individual aboveground biomass of shrubs worldwide. *Global Ecology and Biogeography*, 28(7): 961-975. <https://doi.org/10.1111/geb.12907>
- Fisher, R.A. (1935).** The Design of Experiments. Oliver and Boyd.
- Hernández, J., Gacitúa, S., González, M., Silva, S., Toro, J. & Montenegro, J. (2020).** Efecto del uso de Obras de Conservación de Agua y Suelo (OCAS) en las propiedades del suelo y en la respuesta en crecimiento de plantas agroforestales en secano. Región de Coquimbo. *Ciencia & Investigación Forestal*, 26(1): 7-22. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.524>
- Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G. & Guo, R. (2016).** Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, N° 6. Pp: 166-171. <https://doi.org/10.1038/nclimate2837>
- IPCC. (2006).** Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>
- Lal, R. (2002).** Carbon sequestration in dryland ecosystems of West Asia and North Africa. *Land Degradation & Development*, 13(1), 45-59. <https://doi.org/10.1002/ldr.477>
- Luebert, F. & Plissock, P. (2006).** Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Second edition. Editorial Universitaria. Santiago. 384 p. <https://doi.org/10.5281/zenodo.60800>
- McCullagh, P. & Nelder, J.A. (1989).** Generalized Linear Models (2nd ed.). Chapman and Hall.
- MINAGRI. (2010).** Decreto 83 01-dic-2010. Declara clasificación de suelos agropecuarios y forestales en todo el país, los que indica. Ministerio de Agricultura Chile <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1019962>
- MMA. (2022).** Ley marco de cambio climático. Ley 21455 Ministerio de Medio Ambiente, Chile. <https://bcn.cl/3211s>
- Ojima, D.S., Dirks, B.O. M., Glenn, E.P., Owensby, C.E. & Scurlock, J. O. (1993).** Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world. *Water Air Soil Pollut*, N° 70. Pp: 95-109. <https://doi.org/10.1007/BF01104990>
- Paul, K.I., Larmour, J., Specht, A., Zerihun, A., Ritson, P., Roxburgh, S.H., Sochacki, S. et al. (2019).** Testing the generality of below-ground biomass allometry across plant functional types. *Forest Ecology and Management*, N° 432: Pp: 102-114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.08.043>
- Pérez-Quezada, J.F., Delpiano, C.A., Snyder, K.A., Johnson, D.A. & Franck, N. (2011).** Carbon pools in an arid shrubland in Chile under natural and afforested conditions. *Journal of Arid Environments*, 75(1): 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.08.003>

- Poulter, B., Frank, D., Ciais, P., Myneni, R.B., Andela, N., Bi, J., Broquet, G., Canadell, J.G. et al. (2014).** Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, N° 509. Pp: 600-603. <https://doi.org/10.1038/nature13376>
- R Core Team. (2024).** R: a Language and Environment for Statistical Computing. In R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ripley, B.D. & Venables, W. N. (2023).** MASS: Support Functions and Datasets for Venables and Ripley's MASS. R package version 7.3-60. In <https://CRAN.R-project.org/package=MASS>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965).** An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika*, 52(3/4): 591-611. <https://doi.org/doi.org/10.2307/2333709>
- Silva, S., Gacitúa, S., Hernández, J., Montenegro, J., Jiménez, I., & Silva, E. (2021).** Biodiversidad y obras de conservación de agua y suelo (OCAS) forestadas con especies vegetales en ecosistemas áridos de la Región de Coquimbo. *Ciencia & Investigación Forestal*, 27(2): 51-68. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.549>
- Sione, S., Ledesma, S., Rosenberger, L., Oszust, J., Carpp, I., Wilson, M., Andrade, H. & Sasal, M. (2019).** Fracción de carbono en la biomasa de *Prosopis affinis* Sprengel (Fabaceae) en un bosque nativo del espinal (Argentina). *Agronomía & Ambiente*, 39(1): 6-15. <http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/79>
- Squires, V., Glenn, E. & Ayoub, A. (Ed.). (1995).** Combating global climate change by land degradation. Proceedings of a workshop held in Nairobi, Kenia, 4-8 September 1995. United Nations Environment Programme (UNEP). 366 p. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/27967>
- Wilk, M.B., & Gnanadesikan, R. (1968).** Probability plotting methods for the analysis for the analysis of data. *Biometrika*, 55(1): 1-17. <https://doi.org/10.1093/biomet/55.1.1>
- Woomer, P.L., Touré, A., & Sall, M. (2004).** Carbon stocks in Senegal's Sahel Transition Zone. *Journal of Arid Environments*, 59(3): 499-510. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.03.027>



ARTÍCULO

Regeneración de especies de interés maderero en hoyos de luz en bosques nativos del centro-sur de Chile con plantación suplementaria de *Nothofagus obliqua*.

Eduardo Molina Rademacher¹; Sabine Müller-Using Wenzke² ; Bastienne Schlegel Heldt³ & Andrés Fuentes-Ramírez⁴

¹ Ing. Forestal. Mg. en Manejo de Recursos Naturales. Instituto Forestal, sede Los Ríos. Valdivia, Chile. emolina@infor.cl

² Ing. Forestal. Dr. Forest. Instituto Forestal, sede Los Ríos. Valdivia, Chile. smuller@infor.cl

³ Ing. Forestal. Dr. Ciencias Forestales. Instituto Forestal sede Los Ríos. Valdivia, Chile. bschlegel@infor.cl

⁴ Biólogo. PhD. Ecología y Biología Evolutiva. ECOBOS, Dpto. Ciencias Forestales, Universidad de La Frontera. Temuco, Chile. CENAMAD, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. andres.fuentes@ufrontera.cl

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.631>

Recibido: 09.05.2024; Aceptado 28.05.2025

RESUMEN

Se evaluó la regeneración de especies arbóreas de interés maderero y se caracterizó el crecimiento de una plantación suplementaria de *Nothofagus obliqua* (roble) en una corta de selección en grupos realizada mediante hoyos de luz en un bosque del tipo forestal roble-raulí-coihue, en la comuna de Panguipulli, Región de Los Ríos, Chile. Se evaluó tres hoyos de luz, de distinta forma y superficie, habilitados en similares condiciones de sitio. El levantamiento de la información de la plantación suplementaria de roble consideró la medición de la altura (m), el diámetro a la altura del cuello (DAC en cm) y el diámetro a la altura del pecho (DAP en cm). Adicionalmente, en cada hoyo de luz se evaluó la regeneración de especies de interés maderero en el sotobosque y también las especies de plantas invasoras, lo que se realizó mediante dos transectos en los que se establecieron parcelas cuadradas de 2x2 m. Los resultados muestran que, en los hoyos de luz de mayor superficie, la plantación suplementaria de roble logra un mayor crecimiento en altura y diámetro (i.e., DAC y DAP), alcanzando incrementos en altura de 0,6 m/año. Además, la riqueza de especies de interés maderero también es mayor en los hoyos de luz de mayor tamaño. Finalmente, se sugiere que la corta selectiva en hoyos de luz es una alternativa viable para regenerar especies de interés maderero, cuando la superficie de la intervención es de a lo menos 900 m².

Palabras clave: Claros de dosel, silvicultura cercana a lo natural, regeneración natural.

SUMMARY

The regeneration of tree species of timber interest was evaluated and the growth of a supplementary plantation of *Nothofagus obliqua* (oak) was characterized in a group selection cutting carried out by means of light holes in a forest of the roble-raulí-coihue forest type, in the commune of Panguipulli, Los Ríos Region, Chile. Three light pits were evaluated, varying in shape and surface, in similar site conditions. The data collection of the supplementary oak plantation considered the measurement of height (m), diameter at collar height (DCH in cm) and diameter at breast height (DBH in cm). Additionally, in each light hole the regeneration of species of timber interest in the understory and also invasive plant species was evaluated, which was done by means of two transects in which square plots of 2x2 m were established. The results show that in the larger light holes, the supplementary oak plantation achieves greater growth, both in height and diameter (i.e., DCH and DBH). Reaching a height growth of 0.6 m/year. In addition, the richness of species of timber interest is also higher in the larger light holes. Finally, the results suggest that the application of selective cutting in light holes is a viable alternative to regenerate species of timber interest, when the intervention area is at least 900 m².

Key words: Canopy clearings, close-to-nature silviculture, natural regeneration



INTRODUCCIÓN

La corta de selección es un método de cosecha y regeneración aplicable a bosques multietáneos, que puede ser aplicado de manera individual o en grupos de árboles (Smith *et al.*, 1997; Nyland 2002). Con este método, la regeneración se desarrolla en los espacios resultantes de la eliminación de árboles que se encuentran sobre un diámetro determinado (Donoso, 2013), en donde los árboles del bosque residual actúan como fuente de semillas y brindan protección para el desarrollo de la regeneración (Kumar & Dhanai, 2021), manteniendo así un rodal productivo multietáneo (Nyland, 2002).

En los bosques de roble-raulí-coihue, cuando la corta de selección se aplica de manera individual, se favorece la regeneración de especies tolerantes a la sombra como *Laureliopsis philippiana* (tepa), *Aextoxicon punctatum* (olivillo), *Podocarpus nubigena* (mañío), entre otras, mientras que cuando se realiza en grupos, se favorece la regeneración de especies semitolerantes a la sombra (Donoso, 2013; Müller-Using *et al.*, 2013) como *Eucryphia cordifolia* (ulmo), *Drimys winteri* (canelo) y *Laurelia sempervirens* (laurel).

Kumar & Dhanai (2021) señalan que la aplicación del método de selección puede ser costosa, ya que las operaciones se distribuyen en todo el rodal. Así, la aplicación en grupos, generando hoyos de luz o claros de dosel (Donoso *et al.*, 2018), puede ayudar a mejorar la operabilidad y la rentabilidad de las faenas. De igual manera se menciona que para optimizar la rentabilidad, los árboles a cosechar deben ser de buena calidad y alto valor (Grosse, 2009). Promis (2018) señala que en los bosques templados de Chile se conocen pocas experiencias de claros de dosel como método silvicultural. En los hoyos de luz, el dosel lateral permite regular las condiciones ambientales al interior del área intervenida, generando efectos microclimáticos, como moderación de la temperatura, aumento de la humedad relativa y disminución de la velocidad del viento (Donoso & Navarro, 2022).

En el ámbito legislativo, el Decreto Supremo N° 259 señala que, para el tipo forestal roble-raulí-coihue, se pueden utilizar los métodos de corta y regeneración de tala rasa, árbol semillero, protección y corta selectiva. Para esta última, establece que en la superficie cortada se deben establecer 10 plantas de la misma especie por cada individuo cortado (plantación suplementaria, Ley 20.283).

El tipo forestal roble-raulí-coihue se distribuye en Chile entre las regiones del Maule a Los Lagos. Está compuesto principalmente por una de las especies *Nothofagus obliqua*, *Nothofagus alpina*, *Nothofagus dombeyi* o una combinación de ellas. En estos bosques también se puede encontrar la participación de especies como: *A. punctatum*, *Gevuina avellana*, *Luma apiculata*, *Weinmannia trichosperma*, *Dasyphyllum diacanthoides*, *Podocarpus saligna*, *L. philippiana*, *L. sempervirens*, *Lomatia hirsuta*, *Amomyrtus luma*, *Lomatia ferruginea* y *Lomatia dentata* (Grosse, 2009)

Nothofagus obliqua (roble), es un árbol monoico, de tronco grueso y recto que alcanza hasta 40 metros de altura y 2 metros de diámetro. De manera natural se desarrolla tanto en Chile como en Argentina. En Chile se distribuye entre las regiones de O'Higgins a Los Lagos. Donoso (2006), recomienda que al plantar *N. obliqua* bajo dosel se deben utilizar plantas de entre 0,8 y 1,6 m de altura, lo cual permitiría liberar la copa de la competencia directa y presentaría menores costos para el desbroce o las limpiezas que se deben realizar los primeros años tras el establecimiento. Grosse (1988), registró una mayor sobrevivencia de *N. obliqua* en plantaciones realizadas bajo dosel que en campo abierto. Sin embargo, estas últimas presentaron un mayor crecimiento en altura. Por otro lado, Donoso y Lara (1998) señalan que *N. obliqua* presenta un mejor crecimiento cuando se planta bajo protección.

Los programas de manejo sustentable asociados a los bosques del tipo forestal roble-raulí-coihue, se han concentrado principalmente en actividades de raleo. Sin embargo, debido a la edad y madurez que han alcanzado estos bosques, la temática silvícola debería orientarse hacia métodos adecuados de cosecha y regeneración. Actualmente se cuenta con pocos antecedentes sobre métodos de corta y regeneración para este tipo de bosque (Muller-Using *et al.*, 2014), siendo, poco común la aplicación del método de selección en Chile (Donoso *et al.*, 2020).

A la luz de estos antecedentes, el objetivo general del presente estudio es evaluar el reclutamiento de especies vegetales en un bosque donde se aplicó el método de corta de selección de hoyos de luz, y que incluyó también una plantación suplementaria de *Nothofagus obliqua*. Los objetivos específicos son: (i) caracterizar el crecimiento de una plantación suplementaria de *N. obliqua* en distintos hoyos de luz; (ii) evaluar la riqueza del reclutamiento de especies vegetales en los distintos hoyos de luz; y (iii) evaluar la presencia de especies de interés maderero en relación a las especies invasoras en los hoyos de luz.

MATERIAL Y MÉTODO

Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en el predio Millahue, el cual cuenta con una superficie de 143 ha y se ubica en la comuna de Panguipulli (**Figura 1**), región de Los Ríos (UTM 724562 - 5604264). El uso histórico del predio fue la producción ganadera, cambiando su orientación a uso forestal a partir del año 2000.

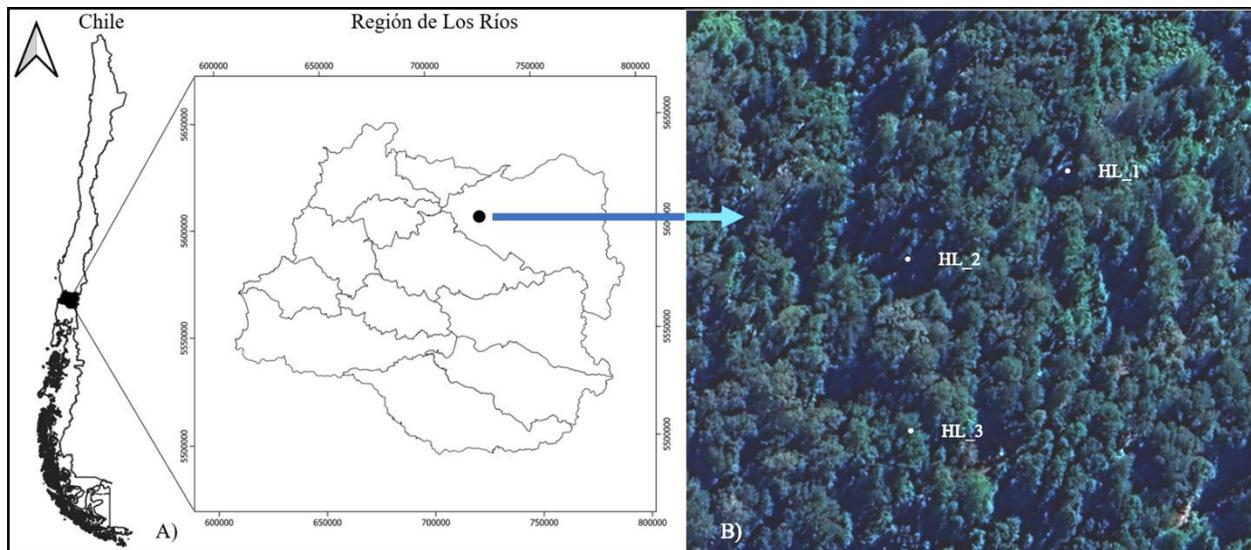


Figura 1. Ubicación del predio Millahue (izquierda) y ubicación de los tres hoyos de luz (HL1, HL2 y HL3) al interior del rodal estudiado (derecha).

El clima presente en el área de estudio es del tipo templado con leve tendencia hacia un clima mediterráneo, lo cual se hace presente en los meses de enero y febrero, en las que se presentan nulas o escasas precipitaciones. La precipitación anual es de 2.500 mm y la temperatura media anual es de 9,5°C (Agromet, 2018). El suelo presente en el área de estudio corresponde a la serie Misceláneo Quebrada, el cual se caracteriza por presentar una textura superficial franca, con profundidad moderada (CIREN, 2003).

Antecedentes del Rodal de Estudio

El rodal en estudio corresponde a un relicto de bosque adulto del tipo forestal roble-raulí-coihue. La superficie del rodal es de 23,8 ha, presenta una densidad de 471 árb/ha y un área basal de 80,29 m²/ha (Carter, 2006). La distribución diamétrica de los árboles se representa como una "jota invertida" (Figura 2). Las principales especies que componen el rodal son *E. cordifolia*, *N. obliqua* y *L. sempervirens*, y las especies secundarias son *Gevuina avellana* (avellano), *L. philippiana*, *Lomatia dentata* (avellanillo), *Nothofagus dombeyi* (coihue) y *Persea lingue* (lingue).

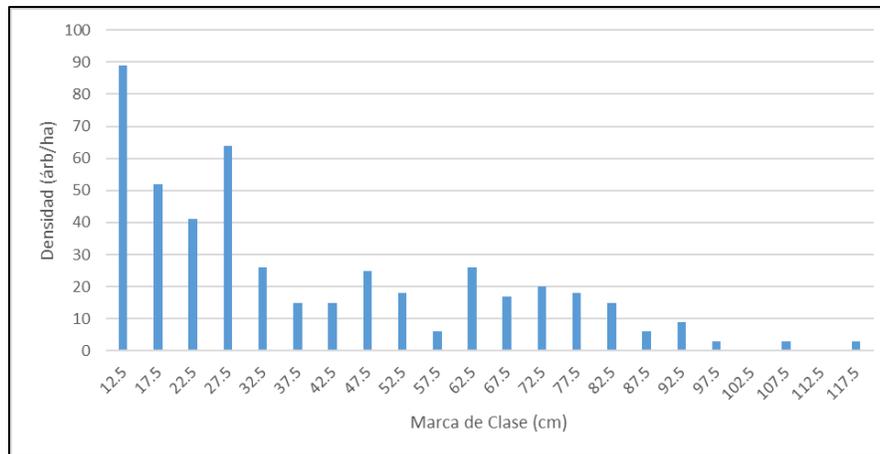


Figura 2. Distribución diamétrica antes de la intervención silvícola en el rodal de estudio.

En el año 2006 se realizó una corta de selección en grupos, estableciendo 3 hoyos de luz. En cada uno de estos hoyos de luz se realizó, ese mismo año, una plantación suplementaria de 10 individuos de *N. obliqua* de 1,6 m de altura, por cada árbol adulto que se cosechó. Las plantas de *N. obliqua* se plantaron en hileras con un espaciamiento de 3x3 m.

El hoyo de luz N°1 (HL1), resultó ser la expansión de un claro pre-existente, por lo que en él solo se cortaron 3 árboles, mientras que en los hoyos de luz N°2 y N°3 (HL2 y HL3) se cortaron 5 árboles en cada uno. El hoyo de luz N°3 es el más pequeño en superficie y se encuentra cercano a un curso de agua. Las características de los hoyos de luz se describen en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Características de los hoyos de luz habilitados en el rodal en estudio.

Hoyo de Luz	Altura Media Árboles Borde (m)	Diámetro Copa*1 (m)	Área de Copa* (m ²)	Claro efectivo** (m ²)	Claro extendido*** (m ²)	Número árboles plantados
HL1	27,5	5,0	24,8	634,3	904,6	30
HL2	25,3	5,1	25,5	713,2	968,5	50
HL3	20,8	6,2	37,9	167,3	353,5	50

* Promedio de árboles borde.

** Superficie medida desde el centro del claro hasta la copa de los árboles borde.

*** Superficie medida desde el centro del claro hasta el fuste de los árboles borde.

Levantamiento de Información

En los años 2011 y 2022, se realizó un censo en los 3 hoyos de luz, donde se midió el DAC, diámetro a la altura del cuello, medido a 2 cm de la base de la planta (cm); el DAP diámetro a la altura del pecho, medido en el fuste a 1,3 m de altura (cm); la altura total de la planta (m); y se evaluó supervivencia de los individuos de *N. obliqua* establecidos en la plantación.

En cada hoyo de luz se estableció dos transectos, abarcando el largo y ancho de los claros. En estos transectos se habilitó parcelas de regeneración de 2 x 2 m. En HL1 y HL2 se habilitó ocho parcelas y en HL3, cinco parcelas. En HL2 se eliminó una parcela, ya que resultó dañada por la caída de un árbol. En cada parcela se registró la frecuencia de la regeneración arbórea y de la vegetación competidora.

Análisis de Datos

Con la información obtenida se construyó gráficos que permitieron evaluar el comportamiento de las variables. Se calculó el Incremento Medio Anual (IMA) para las variables DAC, DAP y altura de las plantas de *N. obliqua*. Para determinar si existen diferencias significativas en el DAC, DAP y altura de la plantación suplementaria, entre los hoyos de luz, se realizó un análisis de varianza (ANOVA), y una prueba de comparación múltiple de medias (Tukey) con un 95% de confianza (i.e. $\alpha = 0,05$).

Con la información de las parcelas de regeneración de plantas vasculares se obtuvo la riqueza de especies en los hoyos de luz. Se identificó el origen, clasificándolo como nativo o introducido y se calculó el índice de diversidad de Shannon y Wiener.

Entre las especies arbóreas, se identificó las que eran de interés maderero, como *Nothofagus sp.*, *L. sempervirens* y *L. philippiana*, entre otras, a las cuales se les determinó la abundancia total y relativa. De igual manera se identificó las especies consideradas como invasoras y se determinó la abundancia total de estas.

RESULTADOS

Crecimiento de la Plantación Suplementaria de *N. obliqua* en Hoyos de Luz.

En el **Cuadro 2** se muestran los parámetros de la plantación suplementaria en cada hoyo de luz, en los años 2011 y 2022, a los 5 y 16 años respectivamente, desde su establecimiento. En los tres hoyos de luz se observó un aumento en el DAC y la altura de las plantas de *N. obliqua*. Este aumento fue significativamente mayor para las plantas establecidas en HL1 y HL2, con superficies sobre los 900 m², en comparación con HL3 (**Cuadro 2**, **Figura 3**).

Cuadro 2. Parámetros de plantación suplementaria de *N. obliqua* en los años 2011 y 2022 (a los 5 y 16 años de edad respectivamente).

Hoyos de luz	DAC (cm)		DAP (cm)		H (m)	
	2011	2022	2011	2022	2011	2022
HL1	2,67 ^a	9,60 ^a	-	8,30 ^a	3,50 ^a	12,70 ^a
HL2	2,68 ^a	9,40 ^a	-	8,40 ^a	3,10 ^a	12,10 ^a
HL3	2,39 ^a	6,70 ^b	-	6,60 ^b	3,30 ^a	9,80 ^b

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos (hoyos de luz), p -value <0,05.

En el **Cuadro 3** se muestra que, en la plantación suplementaria, el mayor IMA para el DAC, DAP y altura, se presentó en el HL1, seguido por HL2. En el HL3 se obtuvo los menores valores de IMA para las tres variables analizadas.

La prueba estadística de Shapiro-Wilk realizada a los datos de DAC de las plantas de *N. obliqua*, arrojó que estas seguían una distribución normal ($P > 0,05$). El análisis de varianza arrojó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre los hoyos de luz. La prueba Tukey permitió identificar que el DAC de las plantas del HL3 se diferenció estadísticamente del de las plantas de los hoyos de luz restantes.

El DAP se comenzó a registrar en el año 2013, ya que este año alcanzó el diámetro mínimo de 4 cm. El DAP de las plantas de los tres hoyos de luz presentó una tendencia creciente, en HL1 y HL2 alcanzó 8,3 y 8,4 cm respectivamente, mientras que en el HL3 solo alcanzó 6,6 cm (**Figura 4**).

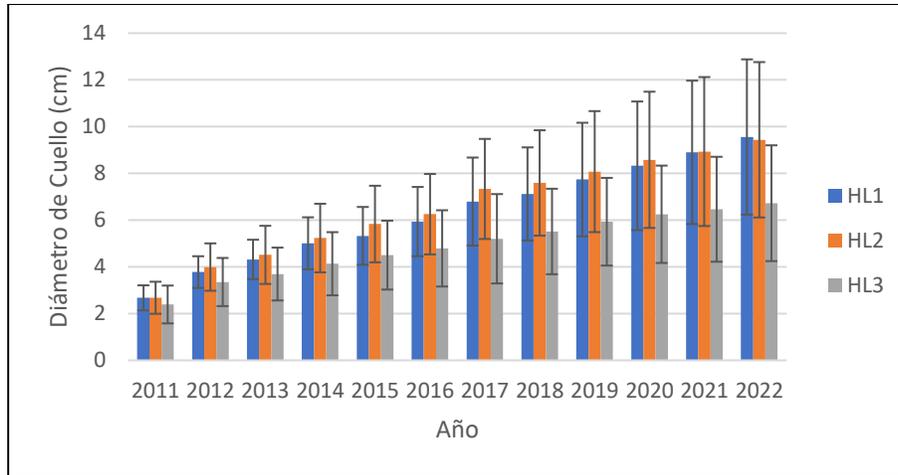


Figura 3. Promedio anual del diámetro de cuello (cm) de las pantas de *N. obliqua* en cada hoyo de luz (HL1, HL2 y HL3).

Cuadro 3. Incremento Medio Anual (IMA) de las variables DAC, DAP y Altura de la plantación suplementaria de *N. obliqua*.

Hoyo de Luz	Incremento Medio Anual (IMA)		
	DAC (cm/año)	DAP (cm/año)	H (m/año)
HL1	0,59 ^a	0,54 ^a	0,61 ^a
HL2	0,58 ^a	0,49 ^a	0,57 ^a
HL3	0,35 ^b	0,33 ^b	0,43 ^b

Letras distintas entre tratamientos (HL) indican diferencias significativas (*p*-value <0,05).

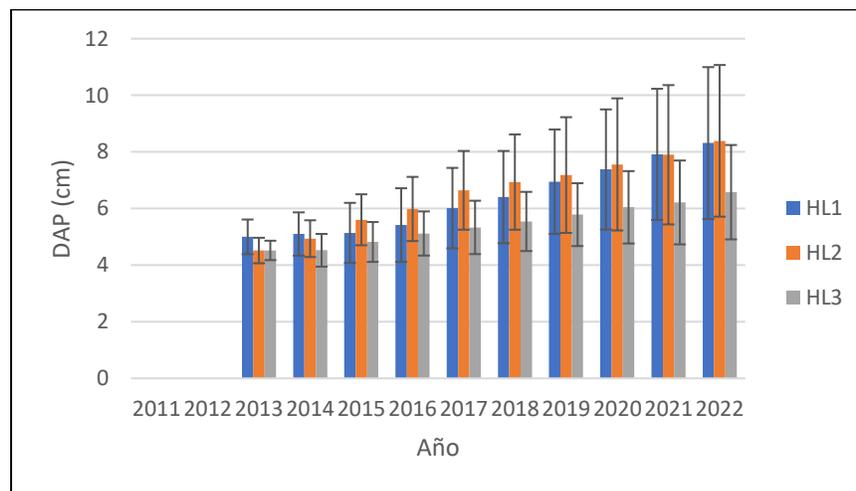


Figura 4. Promedio anual del DAP (cm) de las pantas de *N. obliqua* en cada hoyo de luz (HL1, HL2 y HL3).

La prueba de Shapiro-Wilk, realizada a los DAP de las plantas de *N. obliqua*, muestra que estos presentaron una distribución normal ($P > 0,05$), mientras que el ANOVA arrojó la existencia de diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$). La prueba Tukey demostró que el DAP de las plantas del HL3 se diferenció estadísticamente de las plantas de HL1 y HL2.

De igual manera, la altura de las plantas de *N. obliqua* también presentó una tendencia creciente en los tres hoyos de luz. El máximo crecimiento se presentó en el HL1, en donde la altura alcanzó 12,7 m, seguido por las plantas del HL2 que alcanzaron 12,1 m de altura. En el HL3 la altura registrada fue bastante menor, alcanzando solo 9,8 m (**Figura 5**).

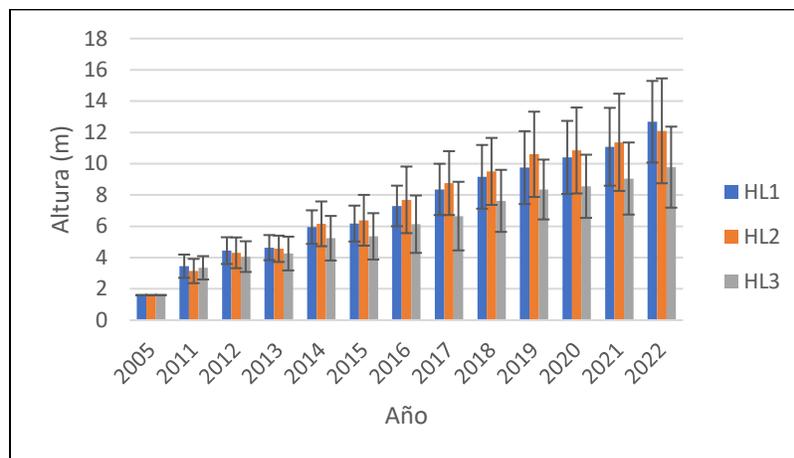


Figura 5. Promedio anual de altura (m) de las plantas de *N. obliqua* en cada hoyo de luz (HL1, HL2 y HL3).

La prueba estadística de Shapiro-Wilk muestra que la altura de las plantas de *N. obliqua*, presenta una distribución normal ($P > 0,05$), a su vez, la prueba ANOVA señaló la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la altura de las plantas en los hoyos de luz ($P < 0,05$). La prueba Tukey identificó que las diferencias se presentaron entre las plantas del HL3 respecto de los otros hoyos de luz.

El crecimiento de la plantación en diámetro y altura ha sido constante a través de los 11 años de monitoreo (**Figuras 4 y 5**). El crecimiento medio anual en área basal es de $0,31 \text{ m}^2/\text{ha}$ y la sobrevivencia es de 77, 80 y 68% para los hoyos de luz N°1, 2 y 3, respectivamente (**Figura 6**).

Reclutamiento de Especies Vegetales en los Distintos Hoyos de Luz

En los 3 hoyos de luz se encontró un total de 16 especies, 15 familias y 15 géneros, sin considerar las especies de helechos y enredaderas. El género *Amomyrtus* de la familia *Myrtaceae*, fue el único que presentó 2 especies, *A. luma* y *A. meli*. Las demás especies registradas pertenecen a géneros y familias diferentes (**Cuadro 4**).

En HL1 y HL2 se presentó un aumento en la riqueza de especies, géneros y familias, entre los años 2011 y 2022, lo cual se refleja en el índice de Shannon-Wiener, mientras que en el HL3 se produjo una disminución de la riqueza (**Cuadro 5**). En el HL1 el aumento de la riqueza se explica, por la incorporación de las especies *A. Meli* y *L. dentata*. A su vez, existe una pérdida de *R. ulmifolius*. En el HL2 la ganancia en la riqueza se explica por la incorporación de *N. dombeyi* y helechos. A su vez, existe una pérdida de *R. magallanicus*. Por otra parte, en el HL3 la disminución en riqueza e índice de Shannon-Wiener, se debe a la pérdida de las especies *F. bicolor*, *B. globosa* y *R. ulmifolius*, y la pérdida de Helechos y *R. diffusus*.

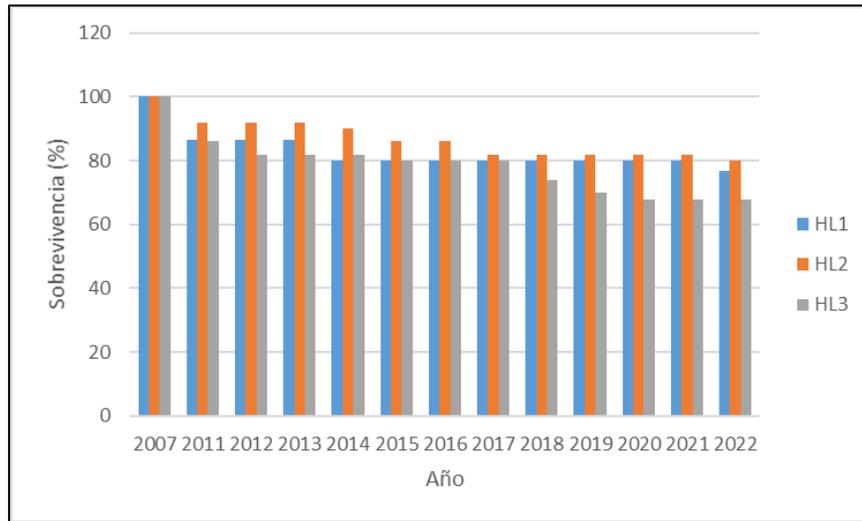


Figura 6. Porcentaje de supervivencia de las plantas de *N. obliqua* en cada hoyo de luz evaluado (HL1, HL2 y HL3).

Cuadro 4. Riqueza de especies registradas en los hoyos de luz (HL1, HL2 y HL3)

Nombre común	Nombre científico	Familia	Origen	HL1	HL2	HL3
murta negra	<i>Rhamnus diffusus</i>	<i>Rhamnaceae</i>	nativo	x		x
canelo	<i>Drimys winteri</i>	<i>Winteraceae</i>	nativo	x		
chupalla	<i>Fascicularia bicolor</i>	<i>Bromeliaceae</i>	nativo	x	x	x
coihue	<i>Nothofagus dombeyi</i>	<i>Fagaceae</i>	nativo	x	x	
corcolén	<i>Azara serrata</i>	<i>Flacourtiaceae</i>	nativo	x	x	
enredadera	-	-	-	x	x	x
helecho	-	-	-	x	x	x
laurel	<i>Laurelia sempervirens</i>	<i>Atherospermataceae</i>	nativo	x	x	
luma	<i>Amomyrtus luma</i>	<i>Myrtaceae</i>	nativo	x	x	x
maqui	<i>Aristotelia chilensis</i>	<i>Elaeocarpaceae</i>	nativo	x	x	x
matico	<i>Buddleja globosa</i>	<i>Scrophulariaceae</i>	nativo			x
meli	<i>Amomyrtus meli</i>	<i>Myrtaceae</i>	nativo	x		
piñol	<i>Lomatia dentata</i>	<i>Proteaceae</i>	nativo	x		
colihue	<i>Chusquea sp.</i>	<i>Poaceae</i>	nativo		x	x
tapa	<i>Laureliopsis philippiana</i>	<i>Monimiaceae</i>	nativo		x	
ulmo	<i>Eucryphia cordifolia</i>	<i>Cunoniaceae</i>	nativo	x	x	x
zarzamora	<i>Rubus ulmifolius</i>	<i>Rosaceae</i>	introducido	x	x	x
zarzaparrilla	<i>Ribes magellanicum</i>	<i>Grossulariaceae</i>	nativo		x	

Cuadro 5. Riqueza de especies, géneros, familias e Índice de Shannon-Wiener (H') en los hoyos de luz (HL1, HL2 y HL3).

Índice	HL1		HL2		HL3	
	2011	2022	2011	2022	2011	2022
Riqueza Especies	11	13	11	12	8	7
Riqueza Géneros	11	12	11	12	8	7
Riqueza Familias	11	12	11	12	8	7
H'	1,76	2,25	2,17	2,32	1,78	1,27



Reclutamiento de Especies de Interés Maderero en los Hoyos de Luz

Se registro un total de 5 especies de interés maderero, las cuales fueron *D. winteri*, *N. dombeyi*, *L. sempervirens*, *L. philippiana* y *E. cordifolia*. A nivel individual, en HL1 y HL2 aumentó de 3 a 4 la cantidad de especies entre los años 2011 y 2022, incorporándose *D. winteri* en HL1 y *N. dombeyi* en HL2 (**Cuadro 6**). Por otra parte, en el HL3 se registró solo 1 especie de interés maderero.

Cuadro 6. Presencia y densidad de especies madereras registradas en los hoyos de luz (plantas/hectárea).

Especie	Abundancia Total (pl/ha)						Abundancia Relativa					
	HL1		HL2		HL3		HL1		HL2		HL3	
	2011	2022	2011	2022	2011	2022	2011	2022	2011	2022	2011	2022
<i>D. winteri</i>	-	2.500	-	-	-	-	-	0,20	-	-	-	-
<i>N. dombeyi</i>	2.500	2.500	-	2.500	-	-	0,33	0,20	0,05	-	-	-
<i>L. sempervirens</i>	2.500	5.000	37.500	21.250	-	-	0,33	0,40	0,75	0,45	-	-
<i>L. philippiana</i>	-	-	10.000	10.000	-	-	-	-	0,20	0,21	-	-
<i>E. cordifolia</i>	2.500	2.500	2.500	13.750	57.500	59.167	0,33	0,20	0,05	0,29	1,00	1,00
Total	7.500	12.500	50.000	47.500	57.500	59.167	1	1	1	1	1	1

En HL1 y HL3 hubo un aumento en la abundancia total de la regeneración de especies madereras, mientras que en HL2 se presentó una leve disminución de esta. En el hoyo de luz 1, la abundancia relativa se compartió entre 3 especies en el año 2011, posteriormente al año 2022 *L. sempervirens* tomo una leve ventaja. En el hoyo de luz 2, *L. sempervirens* presento una mayor abundancia. Mientras que en el hoyo de luz 3, *E. cordifolia* fue la única especie maderera registrada.

Las especies consideradas como invasoras que se encontraron en hoyos de luz fueron *Chusquea sp.* y *R. ulmifolius*. En el hoyo de luz 1, se presentó una disminución de estas plantas, las cuales llegaron a desaparecer en el año 2022. Mientras que en los hoyos de luz 2 y 3 se presentó un aumento de estas especies (**Cuadro 7**).

Cuadro 7. Abundancia total de especies invasoras.

Especie	Abundancia Total (pl/ha)					
	HL1		HL2		HL3	
	2011	2022	2011	2022	2011	2022
<i>Chusquea sp.</i>	-	-	12.500	12.500	42.500	80.000
<i>Rubus ulmifolius</i>	2.500	-	2.500	10.000	10.000	-
Total	2.500	-	15.000	22.500	52.500	80.000

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Desarrollo de la Plantación Suplementaria de *N. obliqua* en Hoyos de Luz en Bosque de Roble-Raulí-Coihue

Los incrementos medios anuales de DAP y altura de la plantación de *N. obliqua* en hoyos de luz han sido constante a través de los 11 años de monitoreo, sin embargo, son menores que los registrados en otras plantaciones realizadas a campo abierto. Por ejemplo, en plantaciones puras de *N. obliqua* con similares condiciones de sitio en el centro sur de Chile, se registra un IMA en DAP sobre 0,9 cm/año y un IMA en altura sobre 1,0 m/año (Donoso *et al.*, 1993; Muller-Using *et al.*, 2020; Riquelme-Buitrano *et al.*, 2023). Por otra parte, en una plantación de *N. obliqua* mixta con otros *Nothofagus* y especies de tolerancia media en la depresión intermedia de la Región de Los Ríos se registra un IMA aún mayor (Riquelme-Buitrano *et al.*, 2023). La diferencia en crecimiento entre *N. obliqua* establecido en hoyos de luz y a campo abierto, puede

deberse a una menor disponibilidad de luz en las aberturas en el dosel, lo cual se condice con un mayor crecimiento registrado en los hoyos de luz de mayor tamaño, sobre 900 m² de superficie. Esto coincide con Grosse (1988) que indica que el crecimiento de plantaciones suplementarias de *N. obliqua* aumenta a medida que aumenta la disponibilidad de luz. Esto se debe a la intolerancia de esta especie a la sombra y a su carácter pionero, que permiten que regenere tras disturbios de mayor escala (Veblen & Ashton, 1978; Muñoz & González, 2009).

La sobrevivencia de *N. obliqua* fue menor que la registrada por Donoso (2006) y Grosse (1988). Lo que podría deberse a la diferencia en la superficie de la intervención y la temporalidad de la evaluación, ya que Grosse (1988) evaluó la sobrevivencia de las plantas tras un año de establecida la plantación.

Los resultados obtenidos sugieren que el establecimiento de plantaciones suplementarias de *N. obliqua*, en hoyos de luz puede ser una alternativa viable, pero puede ser una ventaja considerar aberturas con superficies superiores a 900 m².

Reclutamiento y Riqueza de Especies Vegetales en Hoyos de Luz

Si bien la riqueza de especies registrada en el sotobosque de los hoyos de luz fue baja, esta fue aún menor donde la intervención se aplicó en una menor superficie (HL3), lo que indica que el tamaño de la intervención influye no solo en el crecimiento de las plantas, sino también en la riqueza de especies que se establecen en el sotobosque. Por otra parte, la presencia de las especies competidoras a la regeneración de especies arbóreas, *Chusquea* sp. y *Rubus ulmifolius*, también varió entre los hoyos de luz. En los hoyos de luz 1 y 3, *R. ulmifolius* se registró solo en la primera evaluación, desapareciendo en el año 2022. Esto se debe a su intolerancia a la sombra, que la hace perder participación cuando el bosque comienza a cerrarse. Donoso & Navarro (2022), señalan que la presencia de estas especies (*Chusquea* sp. y *R. ulmifolius*) pueden retrasar el establecimiento de la regeneración de las especies de interés forestal, por lo que se puede considerar controlar su presencia durante los primeros años después de realizada la intervención silvícola.

El reclutamiento de especies de interés maderero fue mayor en los hoyos de luz de mayor superficie, aunque sin registrarse regeneración natural de *N. obliqua*. Similares resultados encontraron Müller-Using et al. (2014), quienes señalan la ausencia de regeneración de esta especie en hoyos de luz de tamaño medio (615 m²) establecidos en bosques puros de *N. obliqua*. Esto concuerda también con Muñoz & Gonzalez (2009), quienes señalan que esta especie no regenera bien en claros pequeños, debido a la intolerancia de esta especie a la sombra y a que requiere disturbios mayores para regenerar de manera natural (Veblen & Ashton, 1978).

Por otra parte, se registra una baja regeneración de *N. dombeyi* en los hoyos de luz de mayor tamaño (HL1 y HL2), lo cual coincide con la intolerancia a la sombra de esta especie. De acuerdo al estudio de Dezzotti et al. (2003), se requieren claros de mayor superficie (sobre 1.500 m²) para lograr las condiciones adecuadas de luz para la regeneración de *N. dombeyi* y *N. obliqua*. A su vez, la regeneración de especies de tolerancia media y tolerantes a la sombra, como *E. cordifolia*, *L. serpervirens* y *L. philippiana*, también fue mayor en hoyos de luz de mayor superficie, lo que coincide con lo reportado por Müller-Using et al. (2014), quienes señalan que para la regeneración de estas especies es suficiente una apertura de 30 m de diámetro.

Implicancias en el Manejo de Bosques del Tipo Forestal Roble-Raulí-Coihue

Si bien este trabajo se realiza en un solo rodal, de bosque adulto del tipo forestal roble-raulí-coihue en la precordillera de los Andes, los resultados permiten una primera aproximación al estudio de cortas de regeneración de selección en hoyos en este tipo de bosques. Se observa que la realización de plantaciones suplementarias de *N. obliqua* en hoyos de luz, generados por la aplicación del método de selección en bosques multietáneos del tipo forestal roble-raulí-coihue, puede ser una buena alternativa si se desea que la especie mantenga su participación en este tipo de bosques. Para esto, es necesario que la intervención permita la entrada de luz necesaria para el desarrollo de esta especie, idealmente con hoyos de luz sobre

los 900 m² de superficie, que permiten también la regeneración natural de especies arbóreas de tolerancia media y/o tolerantes a la luz como *E. cordifolia*, *L. sempervirens* y *L. philippiana*, entre otras. Por otra parte, el tamaño de apertura utilizado en este estudio, no generó un mayor desarrollo de especies competidoras para la regeneración de especies arbóreas, como *Chusquea* sp. y *Rubus ulmifolius*. Sin embargo, es necesario tener presente que, en diferentes condiciones de sitio, estas especies pueden invadir el espacio de crecimiento tras la entrada de luz, lo cual puede retrasar el establecimiento de la regeneración de especies arbórea, siendo importante considerar el control de estas competidoras durante los primeros años después de realizada la intervención silvícola (Donoso & Navarro, 2022).

Los resultados obtenidos indican que, con mayor superficie de apertura, se registra un mayor crecimiento y sobrevivencia de los individuos plantados de *N. obliqua*, mayor regeneración de especies arbóreas de interés maderero de tolerancia media y tolerantes a la sombra y mayor riqueza de especies. Sin embargo, en hoyos de luz de 900 m² no se observa regeneración natural de *N. obliqua*, siendo necesario aberturas de mayor tamaño para regenerar en forma natural esta especie (Muñoz & González, 2009).

Para investigar la regeneración natural de especies arbóreas de interés maderero, y de sus competidoras, en bosques adultos del tipo roble-raulí-coihue, es conveniente repetir este estudio en más sitios. Atendiendo a la dinámica natural de estos bosques (González *et al.*, 2015; Veblen *et al.*, 1996), en los nuevos estudios deberían considerarse hoyos de luz de mayor tamaño (superiores a 1.000 m²). Esto permitirá generar información de manejo silvícola para aplicar la corta de selección en grupos, obteniendo un mayor reclutamiento y desarrollo de las especies de interés forestal y una menor proliferación de las especies competidoras. El objetivo es generar herramientas de manejo silvicultural para cortas de selección en grupos que generen las mejores alternativas entre un mayor reclutamiento y desarrollo de especies arbóreas de interés y menor desarrollo de especies competidoras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Forestal (INFOR) por financiar el estudio; y al técnico forestal Rodrigo Guiñez, por el levantamiento de información en terreno.

AFR agradece el financiamiento del Centro Basal de Excelencia CENAMAD (FB210015) y al proyecto FONDECYT Regular 1241295.

REFERENCIAS

- AGROMET (Red Agroclimática Nacional). (2018).** Boletín nacional de análisis de riesgos agroclimáticos para las principales especies frutales, cultivos y la ganadería.
- Carter, J. (2006).** Plan de manejo bosque nativo: Predio Millahue. Rol 178-20, comuna de Panguipulli, Chile.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). (2003).** Estudio agrológico. Descripción de suelos, materiales y símbolos. X Región. Publicación No. 123. 374 p.
- Dezzotti, A., Sbrancia, R., Rodríguez-Arias, M., Roat, D. & Parisi, A. (2003).** Regeneración de un bosque mixto de *Nothofagus* (*Nothofagaceae*) después de una corta selectiva. Revista Chilena de Historia Natural, 76(4): 591–602. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2003000400004>
- Donoso, P., Monfil, T., Otero, L. & Barrales, L. (1993).** Estudio de crecimiento de plantaciones y renovales manejados de especies nativas en el área andina de las Provincias Cautín y Valdivia. Ciencias e Investigación 7 (2) 255-287.
- Donoso, C. (2006).** Las especies arbóreas de los bosques templados de Chile y Argentina: Autoecología. Marisa Cúneo Ediciones. Valdivia, Chile. 678 p.



- Donoso, C. & Lara, A. (Eds.). (1998).** Silvicultura de los bosques nativos de Chile. Editorial Universitaria. Santiago. 421 p.
- Donoso, P. (2013).** Necesidades, opciones y futuro del manejo multietáneo en el centro-sur de Chile. En: Donoso, P. & Promis, A. (Eds.). Silvicultura en bosques nativos: Avances en la investigación en Chile, Argentina y Nueva Zelanda. Valdivia, Chile. Pp: 52-80.
- Donoso, P. & Navarro, C. (2022).** Silvicultura y manejo de bosques nativos: Ecología aplicada para la conservación de ecosistemas forestales. Editorial Universitaria. Santiago. 510 p.
- Donoso, P., Promis, A. & Soto, D. (2018).** Silvicultura en bosques nativos: Experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos. Oregon, EE.UU.: College of Forestry, Oregon State University.
- Donoso, P.J., Ojeda, P.F., Schnabel, F. & Nyland, R.D. (2020).** Initial responses in growth, production, and regeneration following selection cuttings in hardwood-dominated temperate rainforests in Chile. *Forests*, 11(4): 412. <https://doi.org/10.3390/f11040412>
- González, M.E., Donoso, P.J. & Szejner, P. (2015).** Tree-fall gaps and patterns of tree recruitment and growth in Andean old-growth forests in south-central Chile. *Bosque*, 36(3): 383-394. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300006>
- Grosse, H. (1988).** Crecimiento de plantaciones con raulí y roble bajo dosel en dependencia del grado de luminosidad y fertilización. *Ciencia & Investigación Forestal*, 2(3): 13-30. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1988.53>
- Grosse, H. (Ed.). (2009).** Silvicultura del bosque nativo chileno: Función histórica y opciones futuras sobre la base de manejo sustentable. INFOR.
- Kumar, A. & Dhanai, C. (2021).** Principles & practices of silviculture. Uttarakhand, India: Uttarakhand Open University.
- Muñoz, A., & González, M. E. (2009).** Tree regeneration patterns in canopy gaps after a decade of *Chusquea quila* (Poaceae) dieback in an old-growth remnant forest in the lake district of south-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(2): 185-198. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2009000200002>
- Müller-Using, S., Martin, M., Müller-Using, B., Uribe, J. & Rojas, Y. (2013).** Informe técnico 197. Reporte de prácticas silvícolas 2013. Antecedentes y herramientas para la regeneración del tipo forestal Roble-Raulí-Coigüe. Valdivia, Chile: INFOR. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/20897>
- Müller-Using, S., Martin, M., Bahamondez, C. & Uribe, J. (2014).** Regeneración natural bajo el concepto de la silvicultura cercana a la naturaleza: Antecedentes técnicos del tipo forestal roble-raulí-coigüe. Proyecto 28: 2012.
- Müller-Using, B., Tiemann, M., Donoso, P. et al. (2020).** Crecimiento, desarrollo cualitativo y retorno financiero de una forestación con roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) al pie de monte andino del centro sur de Chile. *Ciencia e Investigación Forestal*, 26(1): 67–82. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.527>
- Nyland, R.D. (2002).** Silviculture: Concepts and applications. Long Grove, Illinois, EE.UU.: Waveland Press, Inc.
- Promis, A. (2018).** Claros de dosel en bosques nativos templados de Chile y Argentina: Conocimientos actuales y desafíos para el futuro. En: Donoso, P., Promis, A. & Soto, D.P. (Eds.). Silvicultura en bosques nativos: Experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos. The Chile Initiative. Oregon State University- College of Forestry, Corvallis, Oregón, EE.UU. Pp: 23-49.
- Riquelme-Buitrano, T., Ojeda, P. & Donoso, P. (2023).** Comparación de crecimiento de *Nothofagus alpina* y *Nothofagus obliqua* en plantaciones puras y mixtas en la depresión intermedia de la Región de Los Ríos, Chile. *Bosque*, 44(1): 263-272. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000100263>
- Smith, D.M., Larson, B.C., Kelty, M.J. & Ashton, P.M.S. (1997).** The practice of silviculture: Applied Forest Ecology (9th ed.). John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.

Veblen, T. T. & Ashton, D. H. (1978). Catastrophic influences on the vegetation of the Valdivian Andes, Chile. *Vegetation*, 36(3): 149-167. <https://doi.org/10.1007/BF02342598>

Veblen, T. T., Donoso, C., Kitzberger, T. & Rebertus, A. J. (1996). Ecology of southern Chilean and Argentinean *Nothofagus* forests. En: Veblen, T.T., Hill, R.S. & Read, J. (Eds.). *The ecology and biogeography of Nothofagus forests*. Yale University Press. Pp: 93-353.





ARTÍCULO

Evaluación de la restauración agroforestal y calidad ecológica de una zona ribereña en la región de Aysén.

Abraham Bustos Palominos^{1,2} ; Jaime Salinas Sanhueza¹; Iván Moya Navarro¹ & Bernardo Acuña Aroca¹

¹ Instituto Forestal, sede Patagonia. Coyhaique, Chile. jsalinas@infor.cl; imoya@infor.cl; bacuña@infor.cl

² Pontificia Universidad Católica de Chile, Fac. Agr. y Sist. Nat., Dpto. Ecosistemas y Medio Ambiente. Santiago, Chile. abraham.bustos@uc.cl

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.634>

Recibido: 27.05.2025; Aceptado 12.06.2025.

RESUMEN

Se evaluó el estado ecológico de un sitio ribereño restaurado en 2008 en la subcuenca del Río Simpson, Aysén, Chile, mediante combinación de análisis remoto e índices ecológicos en terreno. Se utilizó imágenes satelitales (Landsat-7 y Sentinel-2) y Google Earth Pro para analizar la evolución de la cobertura vegetal y productividad primaria durante los años 2008, 2018 y 2024, mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Además, se aplicó en terreno el Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR) para evaluar la calidad de la vegetación en el área restaurada y en un sector no intervenido aguas abajo. Se evidenció una mejora progresiva en la productividad primaria del área restaurada, alcanzando valores cercanos a 1 en 2024, especialmente en sectores cercanos al arroyo, sugiriendo una recuperación funcional del ecosistema. El índice QBR arrojó un valor de 55 (calidad intermedia), influenciado por la coexistencia de especies nativas y exóticas como *Salix spp.* que, si bien cumplen funciones ecológicas relevantes, presentan riesgos por su comportamiento invasor. En contraste, la ribera no restaurada obtuvo un QBR de 25 (condición degradada). Se concluye que la restauración ecológica, incluso a pequeña escala, puede favorecer significativamente la regeneración de la vegetación y los procesos ecológicos en ecosistemas ribereños. Se recomienda sustituir especies exóticas por nativas y complementar el monitoreo con indicadores biológicos que permitan evaluar integralmente la efectividad del proceso de restauración.

Palabras clave: Restauración ecológica, Ecosistemas ribereños, Teledetección, QBR, Especies invasoras

SUMMARY

This study evaluated the ecological condition of a riparian site restored in 2008 in the Simpson River sub-basin, Aysén Region, Chile, using a combined approach of remote analysis and field ecological indices. Satellite images (Landsat-7 and Sentinel-2) and Google Earth Pro were used to analyse the evolution of vegetation cover and primary productivity at the site during the years 2008, 2018, and 2024, by calculating the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). In addition, the Riparian Forest Quality Index (QBR) was applied in the field to assess the quality of riparian vegetation in the restored area and in a non-intervened downstream section. The results indicate a progressive improvement in the primary productivity of the restored area, reaching values close to 1 in 2024, especially in sectors near the stream, suggesting a functional recovery of the ecosystem. The QBR index yielded a value of 55 (medium quality), influenced by the coexistence of native and exotic species such as *Salix spp.*, which, although they fulfil important ecological functions, pose risks due to their invasive behaviour. In contrast, the non-restored riparian area obtained a QBR score of 25, indicating a degraded condition. The study concludes that ecological restoration, even on a small scale, can significantly promote vegetation regeneration and ecological processes in riparian ecosystems. It is recommended to replace exotic species with native ones and to complement monitoring with biological indicators that allow for a comprehensive evaluation of the effectiveness of the restoration process.

Key words: Ecological restoration, Riparian ecosystems, Remote sensing, QBR, Invasive species



INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas ribereños son denominados zonas de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos (Meli *et al.*, 2017). Estos ecosistemas poseen importantes características para el bienestar humano al ser áreas que proveen diferentes servicios ecosistémicos, tales como control de la erosión, regulación del clima, hábitat para especies terrestres y acuáticas, y provisión de servicios culturales (Riis *et al.*, 2020).

Las zonas ribereñas cumplen un rol importante para la biodiversidad terrestre, ya que pueden mantener una mayor abundancia y riqueza de especies en comparación con los ecosistemas adyacentes (Woinarski *et al.*, 2000). Dada su estructura lineal en el paisaje, son utilizadas como corredores biológicos, conectando bosques aislados (Naiman *et al.*, 1993).

Sin embargo, el cambio de uso de suelo en los ecosistemas ribereños y cuencas hidrográficas es una problemática que afecta directamente los servicios ecosistémicos, afectando la escorrentía, la erosión del suelo y alterando el aporte de materia orgánica al ecosistema ribereño (Dudgeon, 2019).

Los ecosistemas ribereños se encuentran bajo amenaza, debido a los efectos constantes y acumulativos del entorno terrestre en donde se encuentran presentes (Piczak *et al.*, 2023). Tal es el ejemplo de las actividades antrópicas, principalmente ligadas al rubro silvoagropecuario que han causado una importante degradación en estos ecosistemas, provocando una disminución y alteración importante en la vegetación ribereña (González *et al.*, 2017), como es el caso de la provocada por el ganado, que aumenta la compactación del suelo, disminuye la infiltración, altera la estructura vegetacional del ecosistema y en consecuencia aumenta la erosión de la ribera (Steinfeld *et al.*, 2009).

La restauración ecológica surge como una solución a la degradación de los ecosistemas ribereños, definiéndose como “el proceso de ayudar al restablecimiento de un ecosistema que ha sido dañado o destruido” (Balensiefer *et al.*, 2004), con la finalidad de restaurar su biodiversidad (Gann *et al.*, 2019). Este proceso sucede principalmente a través del mejoramiento de las características de la estructura, composición y función de un ecosistema (Orsi *et al.*, 2011), a través del proceso de sucesión ecológica (Martínez, 1996).

A partir de lo expuesto, las zonas ribereñas representan áreas con alta prioridad para la conservación de la naturaleza, debido al elevado nivel de amenazas que enfrentan, a su importante rol en la conservación de la diversidad biológica, el mantenimiento de funciones ambientales y la provisión de servicios ecosistémicos. La diversidad de funciones que cumple la vegetación ribereña resalta su valor como un indicador eficaz en los procesos de gestión y planificación territorial, lo que justifica su incorporación como componente fundamental en la evaluación del estado ecológico de los ecosistemas adyacentes, como ecosistemas acuáticos y terrestres (Suárez *et al.*, 2002).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el estado ecológico actual de un área ribereña (*riparian buffer*) que ha sido objeto de procesos de restauración ecológica iniciados en el año 2008, con el fin de analizar su recuperación y aportar información útil para futuras estrategias de conservación y manejo.

MATERIAL Y MÉTODO

Área de Estudio

La región de Aysén cuenta con cuatro cuencas hidrográficas importantes: Palena, Baker, Cisnes y Aysén. La cuenca del Río Aysén abarca una superficie de 11.456 km², que cubre el territorio de las provincias de Aysén y Coyhaique (DGA, 2004). Las principales actividades económicas que se realizan en torno a la cuenca de Aysén corresponden al rubro silvoagropecuario, turismo e industrial (DGA, 2004).



El área de estudio corresponde a una zona ribereña de 3.400 m² (0,34 ha), ubicada en el fundo Las Pampas (45°47'4.28"S, 71°48'54.90"O), propiedad del Sr. Ramón Pradenas, en el sector El Galera, comuna de Coyhaique, región de Aysén (**Figura 1**). Corresponde a una formación de bosque de ñirre (*Nothofagus antarctica*) en transición con la estepa patagónica, zona caracterizada por la alta presión ganadera desde inicios de la colonización. El uso predominante del suelo es el agrícola, destinado principalmente al cultivo de praderas. En ese lugar se encuentra un arroyo permanente que forma parte de la subcuenca del Río Simpson, la cual abarca una superficie total de 3.975 km², presentando un régimen pluvio-nival (DGA, 2004).

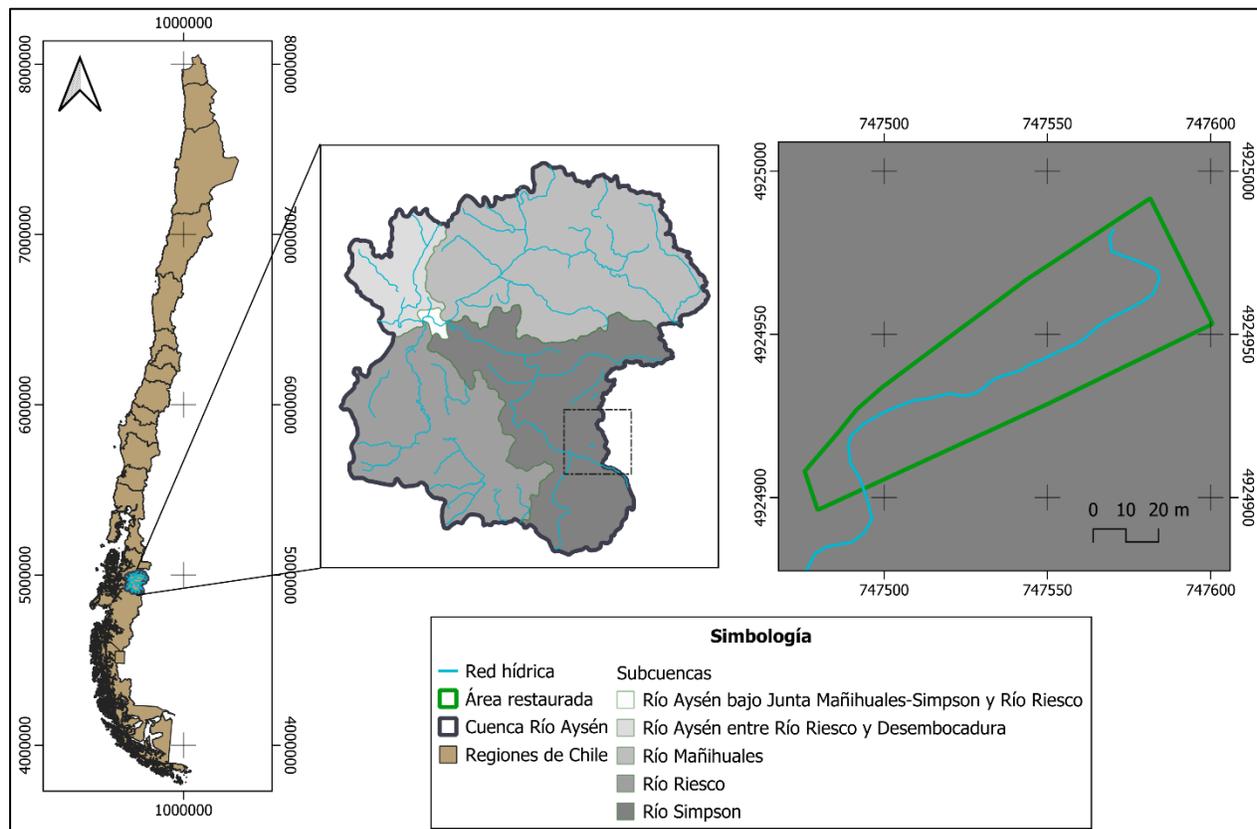


Figura 1: Área de estudio. Subcuenca hidrográfica Río Simpson, región de Aysén, Chile.

La zona de estudio fue intervenida mediante procesos de restauración iniciados en el año 2008, con el objetivo de establecer el primer módulo en la región de Aysén que implementara técnicas de protección de riberas orientadas a la recuperación de cauces degradados.

Entre las acciones ejecutadas, se incluyó la remodelación de taludes, reduciendo su pendiente a aproximadamente 45 grados, con el fin de disminuir la energía del flujo hídrico y reducir la probabilidad de desmoronamiento. Asimismo, se construyeron diques de protección en los sectores más expuestos al impacto constante del agua, con el propósito de desviar el cauce, atenuar su energía y prevenir procesos erosivos, además de resguardar las áreas ya intervenidas mediante plantaciones y estabilización de taludes.

Una de las etapas claves del proceso fue la plantación, la cual requirió la selección de especies de rápido crecimiento. Se incorporaron no solo especies arbóreas, sino también arbustivas y herbáceas, con el objetivo de contribuir a la restauración integral del ecosistema ribereño. La selección de especies consideró tanto su

capacidad de tolerar anegamientos temporales (como en el caso de *Salix spp.*), como su pertenencia a la flora nativa de árboles y arbustos.

Adicionalmente, se implementaron medidas para el control de la matriz agrícola, consistiendo en restringir el acceso a animales al área intervenida mediante cercos, permitiendo el ingreso únicamente en puntos específicos habilitados como bebederos. También se prohibió el cultivo del suelo en las zonas ribereñas, delimitando una franja de protección.

Como resultado, se consolidó una zona de amortiguamiento ribereño (*riparian buffer*), caracterizada por una vegetación continua a lo largo del curso de agua, la cual cumple funciones ecológicas claves. Entre estas se incluyen el rol como biofiltro frente a contaminantes agrícolas (Lowrance, 1992; Hoffmann *et al.*, 2009), y la provisión de hábitat terrestre y acuático debido a la dinámica hídrica asociada a inundaciones, flujo subterráneo y escorrentía superficial (Oakley *et al.*, 1985), entre otras funciones.

Estas zonas de amortiguamiento desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad, especialmente en paisajes agroforestales sujetos a perturbaciones antrópicas constantes.

Análisis Remoto

Para evaluar el área restaurada se realizó un análisis remoto, utilizando imágenes de Google Earth Pro correspondientes al año 2008, 2018 y 2024. En forma complementaria, se descargaron imágenes satelitales de Landsat-7 para el año 2008 y del Sentinel-2 para los años 2018 y 2024, mediante Google Earth Engine. Con la finalidad de evaluar la productividad primaria del área de restauración antes y después de haber realizado el *riparian buffer* se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por su sigla en inglés).

Si bien las imágenes satelitales de Landsat-7 cuentan con una resolución de 30 metros, no son ideales para el análisis de áreas de pequeña escala, por lo mismo solo fueron utilizadas en este estudio para obtener un contexto histórico del área de interés, y por representar la única opción con acceso gratuito disponible para el año 2008. En contraste, las imágenes del satélite Sentinel-2, con una resolución de 10 metros, resultan más adecuadas para estudios enfocados en zonas de menor extensión.

Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR)

De forma complementaria al análisis remoto, se aplicó en terreno el índice QBR (Munné *et al.*, 1998) para evaluar el estado y la calidad de la vegetación ribereña del área restaurada y de la ribera testigo sin restauración, ubicada aguas abajo de la primera. Este índice se enfoca en evaluar cuatro características importantes de los ecosistemas ribereños, ordenadas en cuatro bloques: (1) grado de cobertura vegetal; (2) estructura de la cobertura vegetal; (3) calidad de la cobertura vegetal; y (4) grado de naturalidad del canal fluvial.

La cobertura de vegetación evalúa el porcentaje de cobertura presente en toda la zona ribereña y la conectividad entre el área ribereña y los ecosistemas terrestres adyacentes. La estructura de la cobertura vegetal evalúa la complejidad estructural del ecosistema ribereño, considerando que la heterogeneidad ambiental pueda aumentar la biodiversidad animal y vegetal de la zona. La calidad de la cobertura vegetal permite determinar la naturalidad de las formaciones vegetacionales presentes, dependiendo del número de especies nativas presentes en el área y del tipo geomorfológico de la zona ribereña. El grado de naturalidad del canal fluvial considera principalmente las alteraciones o modificaciones de origen antrópicas que afectan el cauce y el hábitat ribereño.

Cada uno de los bloques recibe una puntuación entre 0 y 25, y la suma de los cuatro bloques corresponde a la puntuación final del índice. Cada bloque es evaluado de forma independiente uno del otro.

Los valores de calidad resultantes se distribuyen en cinco rangos, los cuales se detallan en el **Cuadro 1**.



Cuadro 1: Rangos de calidad según la puntuación del índice QBR.

Nivel de calidad	QBR	Color representativo
Bosque de ribera sin alteraciones, calidad muy buena, estado natural.	≥ 95	Azul
Bosque ligeramente perturbado, calidad buena.	75-90	Verde
Inicio de alteración importante, calidad intermedia.	55-70	Amarillo
Alteración fuerte, mala calidad.	30-50	Naranja
Degradación extrema, calidad pésima	≤ 25	Rojo

(Fuente: Elaboración propia en base a Munné *et al.*, 1998).

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis Remoto

Utilizando Google Earth Pro se logró visualizar las condiciones en que se encontraba el área restaurada en el año 2008, la cual correspondía a una zona ribereña con escasa o nula vegetación, ya para el año 2018 y 2024 la presencia de vegetación era mayor.

La productividad primaria del área restaurada se evaluó en las primaveras de los tres años considerados en el estudio (2008, 2018 y 2024) mediante el cálculo de NDVI (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Valores mínimos y máximos del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en el área de estudio durante el periodo de evaluación.

Año	NDVI Mínimo	NDVI Máximo	Imágenes
2008	0,5	0,7	Landsat-7
2018	0,5	0,9	Sentinel-2
2024	0,5	0,8	Sentinel-2

(Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos).

En el año 2008 la productividad primaria del área restaurada alcanzó un máximo de 0,7, pero que no es uniforme en toda la superficie, predominando una productividad menor, con valores de hasta 0,5 como mínimo, indicando que en el área existe presencia de vegetación, la cual corresponde a pastizales o bosques degradados (**Figura 2**).

En los años 2018 y 2024 se alcanzó una productividad primaria superior a 0,5 y cercana a 1, sugiriendo que el ecosistema se encuentra en buenas condiciones, lo que se puede interpretar como la presencia de vegetación densa y saludable (**Figura 3 y 4**).

Al analizar visualmente el índice mediante el mapa, se observa que en el año 2024 la mayor productividad primaria se concentra en las zonas más cercanas al arroyo. En contraste, al año 2018 la productividad primaria se distribuye de manera más uniforme en toda el área de estudio.

Por otra parte, analizando el sector aledaño al área restaurada, este corresponde a una matriz productiva, caracterizada por la presencia de tierras de cultivo estacional. Debido a esto, su productividad primaria se ha mantenido estable a lo largo del tiempo, lo que indica que el paisaje analizado no ha experimentado una disminución en su capacidad productiva.

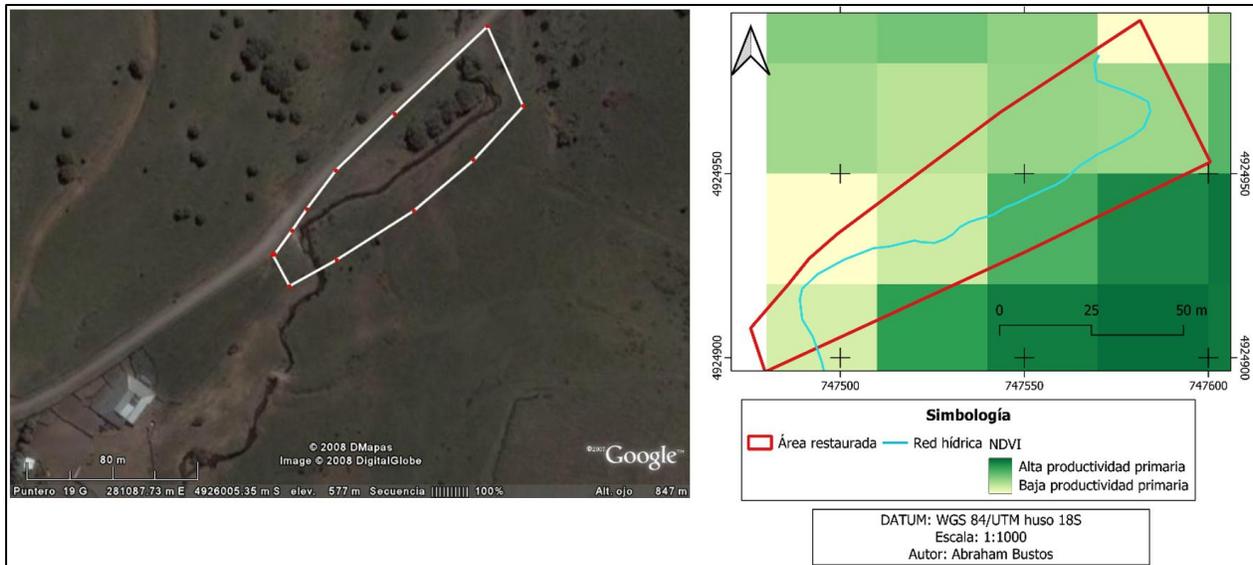


Figura 2. Estado del área restaurada en el año 2008, visualizada mediante Google Earth (izq.) y NDVI generado a partir de una imagen satelital de Landsat-7 (der.).

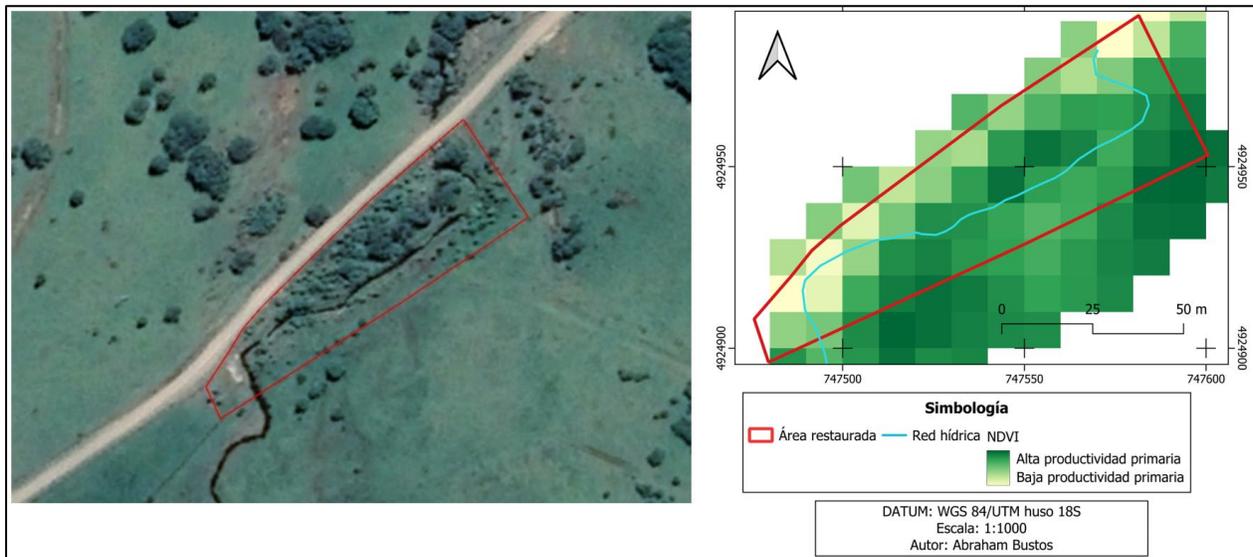


Figura 3: Estado del área restaurada en el año 2018, visualizada mediante Google Earth (izq.) y NDVI generado a partir de una imagen satelital de Sentinel-2 (der.).

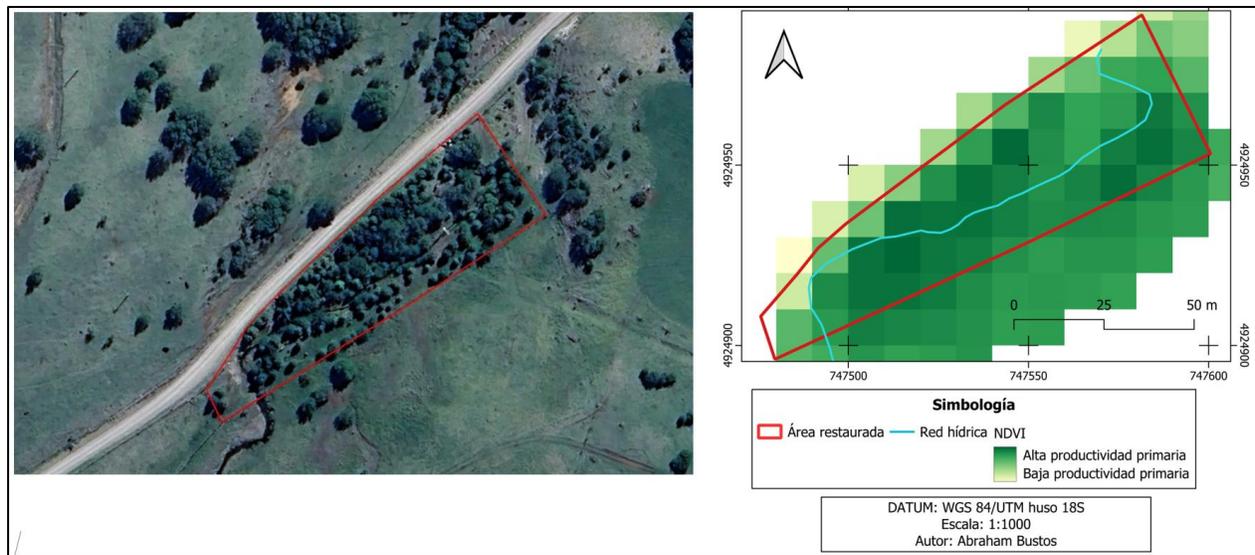


Figura 4: Estado del área restaurada en el año 2024, visualizada mediante Google Earth (izq.) y NDVI generado a partir de una imagen satelital de Sentinel-2 (der.).

Índice de Calidad del Bosque de Ribera (QBR)

El área restaurada presentó un QBR de 55, lo que indica que el ecosistema ribereño posee una calidad intermedia (**Cuadro 3**). Esta condición se relaciona con la restauración realizada en el año 2008, la cual incorporó tanto especies nativas como exóticas. Si bien la presencia de especies introducidas como *Salix spp.* y *Pinus spp.* redujo la puntuación del índice, se observó una baja erosión actual de la ribera y una regeneración favorable de especies nativas, como ñirre (*N. antarctica*).

Salix spp. juega un rol importante al momento de restaurar zonas anegadas ya que, gracias a su desarrollo radicular logra disminuir la velocidad del agua (Datri *et al.*, 2015), reduce los niveles de radiación solar y la erosión eólica, debido a la cobertura de dosel (Datri *et al.*, 2013). También genera un importante aporte de materia orgánica al suelo (Serra *et al.*, 2013).

Las características mencionadas de *Salix spp.* son favorables para realizar restauración en ecosistemas ribereños, donde la degradación es elevada. No obstante, se debe tener presente que este género se encuentra dentro de las especies de plantas vasculares exóticas/asilvestradas (PNUD, 2017); la especie presenta comportamiento invasor, pudiendo llegar a ocupar espacios con o sin vegetación preexistente, y crecer mucho más rápido que las especies nativas (Lewerentz *et al.*, 2019). Posee una reproducción vegetativa que favorece su dispersión aguas abajo, ya que los desganches al detenerse en zonas de ribera comienzan a generar raíces (Thomas & Leyer, 2014).

Estos resultados sugieren que la implementación de una restauración mixta (especies nativas y exóticas), puede ser una estrategia viable para mejorar ciertas condiciones ecológicas de la ribera, particularmente cuando se prioriza la estabilización del suelo y se facilita la recuperación de la vegetación nativa producto del efecto nodriza.

Por el contrario, el área testigo de ribera sin restauración, ubicada aguas abajo de la zona restaurada, presentó un QBR de 25, indicando que el ecosistema ribereño posee una calidad pésima (**Cuadro 3**). Se constató la ausencia total de árboles y arbustos, situación indicativa de un estado de degradación avanzado y una cobertura vegetal insuficiente para cumplir funciones ecológicas básicas, como la protección contra la erosión, provisión de hábitat, mantención de la biodiversidad del área, entre otras.

Cuadro 3: Valores obtenidos para el índice QBR para la ribera restaurada y no restaurada.

Ribera	Nivel de calidad	QBR	Color
Restaurada	Calidad intermedia	55	Amarillo
No restaurada	Calidad pésima	25	Rojo

(Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos).

En las **Figuras 5** y **6**, se presentan imágenes representativas del área de estudio, antes y después de la restauración, y también de la zona testigo de ribera no restaurada.



Figura 5: Estado de la ribera antes y durante el proceso de restauración: (A) Ribera degradada, sin intervenciones de restauración. (B) Ribera con mejoramiento de taludes de 45 grados y muros de sacos como parte del inicio del proceso de restauración. (C) Ribera con presencia de vegetación tras la restauración.



Figura 6: Estado de la ribera después del proceso de restauración. (A) y (B) Condición actual de la ribera intervenida tras el proceso de restauración. (C) Ribera no restaurada ubicada aguas abajo, adyacente a la zona restaurada.

CONCLUSIONES

El análisis de la evolución del área restaurada mediante la implementación de un *riparian buffer* muestra un cambio significativo a lo largo del tiempo. En un principio, en el año 2008, la cobertura vegetal era escasa o nula, lo que daba como resultado una productividad primaria baja, como se pudo corroborar en las imágenes satelitales de ese año.

Cabe mencionar que el análisis para el año 2008 no es del todo preciso, debido a la baja resolución de Landsat-7. Aun así, permite tener un contexto del área que se restauró y poder contrastarla con la productividad primaria que presenta actualmente la zona ribereña intervenida.

Con el tiempo, la vegetación se desarrolló de manera progresiva, favorecida por la restauración de la zona ribereña. Este crecimiento permitió una mejora en la estructura y densidad de la vegetación, dando como resultado un aumento de la productividad primaria en los años siguientes.

En la actualidad, el área restaurada presenta una mayor cobertura vegetal y una productividad primaria significativamente más alta, lo que indica que el ecosistema ribereño ha recuperado parte de su funcionalidad. Este proceso es indicativo de un ecosistema más saludable, capaz de brindar servicios ecosistémicos importantes, tales como, filtrar sedimentos y pesticidas de tierras agrícolas, refugio y alimento para animales, protección de cultivos por inundaciones, mejoramiento del paisaje, entre otros.

Cabe destacar que este estudio se llevó a cabo a una escala espacial reducida y en condiciones ambientales específicas correspondientes a una formación de bosque de ñirre (*N. antarctica*) en transición hacia la estepa patagónica, en la comuna de Coyhaique.

Fomentar la aplicación de zonas de amortiguamiento ribereño (*riparian buffer*) a escala operacional, es un desafío prioritario para la institucionalidad silvoagropecuaria y ambiental. Su implementación masiva se puede materializar mediante la priorización de prácticas agroambientales en los instrumentos de fomento vigentes.

RECOMENDACIONES

Actualmente, la ribera intervenida muestra signos positivos de restauración, con un aumento en la cantidad de hábitat disponible dentro del paisaje. Sin embargo, para mejorar su calidad ecológica, es fundamental avanzar en la remoción de especies exóticas, ya que su presencia puede limitar el establecimiento y desarrollo de especies nativas, tanto en el mismo lugar, como aguas abajo. Las técnicas recomendadas para reducir la densidad de individuos exóticos incluyen la corta o anillado. No obstante, es importante considerar el rol funcional que cumple cada individuo en el sitio. Por ejemplo, si un árbol exótico se encuentra en un sector con alta densidad de especies nativas, su extracción es recomendable. En cambio, si dicho individuo contribuye a la estabilización del suelo en zonas propensas a la erosión, se sugiere conservarlo de manera temporal, complementando su presencia con la plantación de especies nativas que ya habitan el área.

Un aspecto favorable de este enfoque es que el área de ribera en restauración es de pequeña escala, lo que permite utilizarla como un espacio experimental para evaluar la respuesta de las especies y validar los efectos de las prácticas de manejo propuestas, además de un área demostrativa para realizar transferencia técnica.

Por otra parte, como posibles líneas de evaluación complementarias a la información presentada, se sugiere incorporar un censo de avifauna y mamíferos que habitan de forma permanente o esporádica en el área restaurada. También se recomienda medir el hábitat fluvial mediante la aplicación del Índice de Evaluación de Hábitat Fluvial (IHF, por su sigla en inglés) y evaluar la presencia de macroinvertebrados para caracterizar la calidad biológica del agua del arroyo, utilizando el índice del grupo de trabajo para el monitoreo biológico ibérico (IBMWP, por su sigla en inglés) (Jáimez-Cuéllar *et al.*, 2002).

Finalmente, la medición de la calidad del agua en tres puntos del arroyo (aguas arriba, en el área restaurada y aguas abajo) permitiría comparar las diferencias en su calidad y determinar si la zona restaurada cumple efectivamente una función de biofiltro.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de esta publicación agradecen al Ministerio de Agricultura de Chile, por el apoyo financiero que permite la investigación de mediano y largo plazo en temáticas ligadas a la restauración de ecosistemas agroforestales patagónicos de Chile. Se agradece al propietario Sr. Juan Ramon Pradenas por su constante disposición y apoyo a INFOR. También se agradece a los técnicos de INFOR Bernardo Acuña y Exequiel Díaz por su apoyo en las mediciones de terreno.

REFERENCIAS

- Balensiefer, M., Rossi, R., Ardinghi, N., Cenni, M., & Ugolini, M. (2004).** SER international primer on ecological restoration. Society for Ecological Restoration, Washington.
- Datri, L.A., Faggi, A.M. & Gallo, L. (2015).** Modelo de invasión no lineal y funciones bioingenieras de *Salix fragilis* en Patagonia (Argentina). *European Scientific Journal*, 11(10). <https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/5562>
- Datri, L.A., Maddio, R.A., Faggi, A.M., & Gallo, L. (2013).** Bosques ribereños y su relación con regímenes hidrológicos en el norte patagónico. *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 4(2): 245-259.
- DGA (Dirección General de Aguas). (2004).** Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad: Cuenca del río Aysén. Ministerio de Obras Públicas, Gobierno de Chile.
- DGA (Dirección General de Aguas). (2004).** Cuenca del Río Aysén. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Chile. Realizado por CADE-IDEPE.
- Dudgeon, D. (2019).** Multiple threats imperil freshwater biodiversity in the Anthropocene. *Current Biology*, 29(19): R960-R967. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.002>
- Gann, G.D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C.R., Jonson, J., Hallet, J. et al. (2019).** International principles and standards for the practice of ecological restoration. *Restoration Ecology*, 27(S1): S1–S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- González, E., Felipe-Lucia, M.R., Bourgeois, B., Boz, B., Nilsson, C., Palmer, G. & Sher, A.A. (2017).** Integrative conservation of riparian zones. *Biological Conservation*, Vol. 211, part B. Pp: 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.10.035>
- Hoffmann, C. C., Kjaergaard, C., Uusi-Kämpä, J., Hansen, H. C. B., & Kronvang, B. (2009).** Phosphorus retention in riparian buffers: review of their efficiency. *Journal of environmental quality*, 38(5): 1942-1955. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0087>
- Jáimez-Cuéllar, P., Vivas, S., Bonada, N., Robles, S., Mellado, A., Álvarez, M., ... & Alba-Tercedor, J. (2002).** Protocolo GUADALMED (PRECE). *Limnetica*, 21(3-4): 187-204. <https://doi.org/10.23818/limn.21.25>
- Lewerentz, A., Egger, G., Householder, J.E., Reid, B., Braun, A.C., & Garófano-Gómez, V. (2019).** Functional assessment of invasive *Salix fragilis* L. in north-western Patagonian flood plains: A comparative approach. *Acta Oecologica*, Vol. 95. Pp: 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2019.01.002>
- Lowrance, R. (1992).** Groundwater nitrate and denitrification in a coastal plain riparian forest. *Journal of Environmental Quality*, 21(3): 401-405. <https://doi.org/10.2134/jeq1992.00472425002100030017x>
- Martínez, E. (1996).** La restauración ecológica. *Ciencias*, 43(1): 56-61.
- Meli, P., Ruiz, L., Aguilar, R., Rabasa, A., Rey-Benayas, J.M., & Carabias, J. (2017).** Bosques ribereños del trópico húmedo de México: un caso de estudio y aspectos críticos para una restauración exitosa. *Madera y Bosques*, 23(1): 181–193. <https://doi.org/10.21829/myb.2017.2311118>

- Munné, A., Solá, C., & Prat, N. (1998). QBR: An index to evaluate the quality of riparian ecosystems; QBR: Un índice rápido para la evaluación de la calidad de los ecosistemas de ribera. *Tecnología del Agua*, 175.
- Naiman, R.J., Decamps, H., & Pollock, M. (1993). The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. *Ecological applications*, 3(2): 209-212. <https://doi.org/10.2307/1941822>
- Oakley, A. L., Collins, J. A., Everson, L. B., Heller, D. A., Howerton, J. C., & Vincent, R. E. (1985). Riparian zones and freshwater wetlands. Management of wildlife and fish habitats in forests of western Oregon and Washington. Part, 58-80.
- Orsi, F., Geneletti, D., & Newton, A.C. (2011). Towards a common set of criteria and indicators to identify forest restoration priorities: An expert panel-based approach. *Ecological Indicators*, 11(2): 337–347. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.001>
- Piczak, M.L., Perry, D., Cooke, S.J., Harrison, I., Benitez, S., Koning, A., Peng, L. *et al.* (2023). Protecting and restoring habitats to benefit freshwater biodiversity. *Environmental Reviews*, 32(3): 438-456. <https://doi.org/10.1139/er-2023-0034>
- PNUD (2017). Catálogo de las especies exóticas asilvestradas/naturalizadas en Chile. Laboratorio de Invasiones Biológicas (LIB), Universidad de Concepción. Proyecto GEF/MMA/PNUD. Santiago, Chile. 61 p.
- Riis, T., Kelly-Quinn, M., Aguiar, F.C., Manolaki, P., Bruno, D., Bejarano, M.D., Clerice, N. *et al.* (2020). Global overview of ecosystem services provided by riparian vegetation. *BioScience*, 70(6): 501–514. <https://doi.org/10.1093/biosci/biaa041>
- Serra, M.N., Albariño, R. & Díaz Villanueva, V. (2013). Invasive *Salix fragilis* alters benthic invertebrate communities and litter decomposition in northern Patagonian streams. *Hydrobiologia*, Vol. 701. Pp: 173-188. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1270-2>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. & De Haan, C. (2009). La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones. La Iniciativa para Ganadería. Medio Ambiente y Desarrollo (LEAD) and FAO. Rome, Italy. 464 p.
- Suárez, M.L., Vidal-Abarca, M.R., Sánchez-Montoya, M.D.M., Alba-Tercedor, J., Álvarez, M., Avilés, J., Bonada, N. *et al.* (2002). Las riberas de los ríos mediterráneos y su calidad: el uso del índice QBR. *Limnetica*, 21(3–4): 135-148. <https://doi.org/10.23818/limn.21.22>
- Thomas, L. K., & Leyer, I. (2014). Age structure, growth performance and composition of native and invasive Salicaceae in Patagonia. *Plant Ecology*, Vol. 215. Pp: 1047-1056. <https://doi.org/10.1007/s11258-014-0362-7>
- Woinarski, J.C.Z., Brock, C., Armstrong, M., Hempel, C., Cheal, D. & Brennan, K. (2000). Bird distribution in riparian vegetation in the extensive natural landscape of Australia's tropical savanna: a broad-scale survey and analysis of a distributional database. *Journal of Biogeography*, 27(4): 843-868. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2000.00439.x>



ARTÍCULO

Bienes y servicios de las formaciones xerofíticas: percepción, usos ancestrales y métodos de extracción en la Regiones de Coquimbo y Atacama.José Hernández Cartes^{1*}, Sergio Silva Soto¹, Sandra Gacitúa Arias¹ & Marlene González González².¹Instituto Forestal, sede Diaguítas. La Serena, Chile.²Instituto Forestal, sede Metropolitana. Santiago, Chile.DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.627>

Recibido: 11.04.2025; Aceptado 30.07.2025

RESUMEN

Los ecosistemas xerofíticos naturales de la región de Coquimbo y Atacama presentan un alto nivel de degradación, lo que afecta significativamente los bienes y servicios que estos proporcionan. Es necesario desarrollar estrategias y prácticas de manejo sustentable, sin embargo, falta información y hay limitaciones metodológicas que dificultan la evaluación de los bienes y servicios asociados a tales formaciones. Este estudio busca identificar, describir y cuantificar los bienes y servicios, que proporcionan las formaciones xerofíticas, considerando sus mecanismos de extracción, usos ancestrales, actuales y potenciales, en base al conocimiento tradicional. Esta información permitió reconocer y poner en valor los servicios que proveen las formaciones xerofíticas, evaluando tanto los beneficios como las posibles limitaciones que derivan de su uso. Para lograr estos objetivos, las regiones estudiadas se dividieron en seis macrozonas; en cada una de ellas se realizaron encuestas aplicando una metodología cualitativa enmarcada en un diseño exploratorio y descriptivo, utilizando la teoría fundamentada como método de investigación y análisis.

Los resultados indican que, en ambas regiones, las comunidades locales continúan dependiendo del entorno natural y han desarrollado un conocimiento profundo sobre las propiedades de la flora local, además de una comprensión detallada de su entorno, lo que les permite identificar áreas específicas para la recolección de material vegetal, cuyo uso principal es medicinal, alimento animal, alimento humano y leña o carbón.

Palabras claves: Formaciones xerofíticas, Bienes y servicios ambientales, Usos ancestrales.

SUMMARY

The natural xerophytic ecosystems of the Coquimbo and Atacama regions have a high level of degradation, which significantly affects the goods and services they provide. Therefore, it is necessary to develop strategies aimed at sustainable management practices. However, there is a lack of information and methodological limitations that hinder the evaluation of the goods and services associated with xerophytic formations. In this context, the present study aimed to identify, describe and quantify the goods and services provided by xerophytic formations, considering their extraction mechanisms, ancestral, current and potential uses, based on traditional knowledge. This information allowed to recognize and value the services provided by xerophytic formations, evaluating both the benefits and the possible limitations derived from their use. To achieve these objectives, the regions studied were divided into six macro zones; in each of them, surveys were carried out applying a qualitative methodology framed in an exploratory and descriptive design, using grounded theory as a research and analysis method.

The results indicate that in both regions, local communities continue to rely on the natural environment and have developed a deep knowledge of the properties of local flora, as well as a detailed understanding of their environment, allowing them to identify specific areas for the collection of plant material, the main uses of which are medicinal, animal feed, human food and firewood or charcoal.

Key words: Xerophytic ecosystems, Environmental goods and services, Ancestral uses.



INTRODUCCIÓN

La importancia de un ecosistema, como proveedor de servicios para la sociedad, resulta de una combinación entre la percepción social y su capacidad para proveer distintos servicios ecosistémicos. Sin embargo, no necesariamente una mayor biodiversidad del ecosistema se traduce en la provisión de mayores bienes y servicios, pero permite una mayor sustentabilidad. Diversos estudios han establecido que la pérdida acelerada de especies impacta directamente el equilibrio de los ecosistemas, pudiendo desestabilizar o inclusive llevar al colapso a ecosistemas completos (Butchart *et al.*, 2010; Plissock *et al.*, 2019). Es así, como la creciente demanda de recursos naturales necesarios para el desarrollo de actividades antrópicas ha conllevado a cambios en el uso del suelo, pérdida de biodiversidad, extinción de especies, desertificación, cambio climático, contaminación, salinización de los suelos, introducción de especies invasoras, cambio en las concentraciones de CO₂ atmosférico, fragmentación de hábitats y transformación de las condiciones y dinámicas del entorno, que con el tiempo han alterado la estructura, función y composición de los ecosistemas, comprometiendo el bienestar humano y de su hábitat (Castañeda, 2014).

En Chile, a partir del 2005 se iniciaron diversos estudios de los servicios ecosistémicos; particularmente el núcleo científico FORECOS comenzó investigaciones relacionadas con los servicios ecosistémicos forestales, destacándose estudios sobre la provisión de agua, biodiversidad y madera (e.g., Oyarzún *et al.*, 2005; Lara *et al.*, 2009). Con el tiempo, estas investigaciones ampliaron su enfoque, incorporando el mapeo de servicios ecosistémicos (e.g., Nahuelhual *et al.*, 2013; 2015, valoraciones económicas (e.g., Nahuelhual *et al.*, 2007) y recientemente, la valoración de servicios culturales (e.g., Barrena *et al.*, 2014).

A lo largo de los años, la cantidad de investigaciones sobre servicios ecosistémicos en Chile ha ido en aumento, centrado principalmente en ecosistemas terrestres, acuáticos y marino-costeros (FORECOS, 2014; De la Barrera *et al.*, 2015), con un predominio de estudios enfocados en la valoración económica, siendo menos frecuente el mapeo del valor social en el marco de los servicios ecosistémicos. En los últimos años, los estudios han comenzado a adoptar una visión más integral, que incorpora el bienestar humano y resalta la interdependencia de los sistemas socioecológicos, visibilizando especialmente los servicios culturales (FORECOS, 2014; De la Barrera *et al.*, 2015). Sin embargo, persisten importantes vacíos de información sobre los beneficios que los ecosistemas brindan y su contribución al bienestar social, especialmente en el caso de los ecosistemas desérticos del norte del país.

Las regiones de Coquimbo y Atacama destacan por albergar la mayor diversidad de plantas nativas de Chile, con un notable endemismo del 53,5%, y se sitúan dentro de uno de los 36 *hotspots* de biodiversidad a nivel mundial (Squeo *et al.*, 2001; 2008). A pesar de su relevancia ecológica, solo un 0,37% de la superficie regional está destinada a la conservación formal dentro del Sistema de Áreas Silvestres Protegidas del Estado. A lo largo de los años, se han sumado nuevas iniciativas de conservación, como la incorporación de áreas del SNASPE a la Red Mundial de Reservas de Biosfera (e.g., Bosque Fray Jorge) y la ampliación de áreas protegidas (e.g., Reserva Nacional Pingüino de Humboldt). Además, se han implementado figuras de conservación privada, como los derechos reales de conservación (e.g., Hacienda El Durazno), contempladas en la Estrategia Nacional de Biodiversidad 2017-2030.

A pesar de estos avances, la degradación de las formaciones xerofíticas, principalmente debido al uso indiscriminado de su flora para leña y carbón, sigue siendo un problema grave en algunas áreas del norte de Chile (Santander, 2003). La pérdida de estos ecosistemas y los bienes y servicios que proveen resalta la urgente necesidad de implementar prácticas de manejo sostenible.

No obstante, aún existe una falta de información y limitaciones metodológicas que dificultan la adecuada evaluación de los bienes y servicios que aportan las formaciones xerofíticas, información esencial para el manejo y toma de decisiones informada. Entender el valor de los bienes y servicios ecosistémicos es esencial para desarrollar indicadores que permitan evaluar los costos y beneficios de los proyectos que involucren la explotación de estos recursos, facilitando la toma de decisiones que maximicen el bienestar social. Asimismo, es fundamental clasificar las funciones de los actores sociales en la gestión de los

servicios ecosistémicos, lo que permitirá comprender mejor la influencia y el nivel de importancia de quienes participan en el uso y manejo de los recursos naturales.

En particular, es necesario estudiar los servicios ecosistémicos de la vegetación xerofítica desde la valoración que le otorgan las comunidades locales, incluidas las ancestrales, con el fin de establecer el impacto que tiene esta vegetación en sus vidas. Este conocimiento permitirá explorar aspectos hasta ahora poco documentados, como las partes de la planta utilizadas, las preferencias de uso y los métodos de extracción, brindando información clave para el manejo sostenible de estos ecosistemas únicos. En tal contexto, el objetivo del presente estudio fue identificar, describir y cuantificar los bienes y servicios, que proporcionan las formaciones xerofíticas en función de los mecanismos de extracción, usos ancestrales, actuales y potenciales, en base al conocimiento tradicional de las comunidades.

MATERIALES Y METODOS

Obtención de Información a través de Encuestas

Entre los meses de mayo 2019 y enero 2020 se realizaron 155 encuestas en la Región de Coquimbo (Elqui, Limarí y Choapa) y la Región de Atacama (Chañaral, Copiapó y Huasco) (**Cuadro 1**).

Para la selección de las localidades, se utilizó la cartografía con presencia de formaciones xerofíticas y asentamientos humanos definidos en distritos censales por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2018). A partir del cruce de dicha información, se obtuvo un mapa temático con el total de localidades posibles de evaluar para aplicar la encuesta.

Para garantizar la representatividad de la muestra y asegurar una cobertura homogénea y completa de las localidades objetivo, cada región fue dividida en 6 cuadrantes de igual superficie utilizando una malla de 3x2 (latitud x longitud). En cada cuadrante, se asignó un número de localidades a encuestar proporcional al total de localidades presentes en él, con un mínimo de 20 encuestas por provincia. De este modo, los cuadrantes con mayor número de localidades recibieron una mayor asignación de encuestas (**Cuadro 1**). Una vez seleccionada la localidad, se procedió a escoger aleatoriamente los hogares, asegurándose que los encuestados residieran y/o desarrollaran sus actividades socioeconómicas en la localidad seleccionada.

La encuesta incluyó preguntas cerradas y abiertas (Hernández, 2018), dirigidas a habitantes que residen y/o desarrollan sus actividades socioeconómicas en los asentamientos de las regiones de Coquimbo y Atacama. La encuesta estuvo compuesta por 7 ítems, que abarcan un total de 11 preguntas, estructuradas en torno a cuatro puntos de información:

1. Identificación de características socioeconómicas clave del entrevistado, incluyendo edad, sexo, nivel educacional, jefatura de hogar, lugar de residencia, permanencia en la ciudad y nivel de ingresos. Adicionalmente, se abordó la relación de la población con el deterioro de la vegetación xerofítica en las regiones estudiadas.
2. Evaluación de la percepción y la valoración que le otorga el encuestado a la vegetación xerofítica. Se exploró sobre el nivel de conocimiento del recurso, distribución, uso, importancia de la vegetación, uso del agua para mantener la vegetación y la valoración de las personas por su localidad.
3. Identificación de usos y materia prima usada, métodos de extracción actual y potencial de las especies que conforman las formaciones xerofíticas.
4. Usos y técnicas ancestrales de cosecha vinculadas a las especies que conforman las formaciones xerofíticas. Además, de casos específicos relacionados con la recolección, producción y venta de productos forestales no madereros (PFNM) derivados de estas especies.

Las preguntas cerradas del cuestionario, contienen opciones de respuesta que fueron previamente delimitadas, se evitaron las preguntas dicotómicas y cuando fue el caso, se generó correlativamente una pregunta abierta para enriquecer la información. Las preguntas abiertas, se codifican una vez que se

conocen todas las respuestas de los participantes. La técnica consiste en encontrar y dar nombre a los patrones generales de respuesta similares o comunes, listar estos patrones y después asignar un valor numérico o un símbolo a cada patrón para el posterior análisis.

Cuadro 1. Selección de puntos de muestreos o localidades para la aplicación de encuestas en la Región de Coquimbo y Atacama.

Región	Provincia	Cuadrante	N° de localidades encuestadas
Coquimbo	Elqui	1	9
		2	5
		3	4
		4	6
		5	0
		6	1
		Subtotal	25
	Limarí	1	5
		2	2
		3	13
		4	5
		5	3
		6	2
Subtotal	30		
Choapa	1	9	
	2	5	
	3	4	
	4	6	
	5	0	
	6	1	
	Subtotal	25	
Atacama	Chañaral	1	0
		2	13
		3	0
		4	12
		5	0
		6	0
	Subtotal	25	
	Copiapó	1	9
		2	9
		3	2
		4	5
		5	0
		6	0
Subtotal	25		
Huasco	1	9	
	2	1	
	3	9	
	4	6	
	5	0	
	6	0	
Subtotal	25		
Total			155

A continuación, se entrega un ejemplo de los ítems que conforman la encuesta.



Percepción sobre problemas del entorno. En su opinión, considerando las siguientes alternativas, ponga una nota del 1 al 4 a los problemas de mayor importancia que usted considera deben ser resueltos en su localidad (**Cuadro 2**). Se solicitó a los encuestados reflexionar sobre los problemas que como habitantes de la localidad y/o asentamiento perciben y reconocen en su cotidianeidad, de lo más a lo menos importante. La elaboración de las categorías a evaluar se relaciona con el conocimiento que se tiene de los territorios y los elementos que se relacionan con los bienes y servicios ecosistémicos.

Cuadro 2. Preguntas relacionadas con la percepción del encuestado sobre los principales problemas que requieren ser resueltos en su localidad.

Variable	Nota
Carencia de vegetación	
Carencia de agua riego	
Carencia de agua potable	
Erosión de suelo	
Calidad del aire	
Falta de lluvias	
Ganado caprino productivo	
Fauna (biodiversidad, animales invasores)	
Otro (Indique)	
Notas.	
1= No es importante; 2= Poco importante; 3= medianamente importante; 4= Importante	

En el caso de los usos ancestrales de las especies que conforman las formaciones xerofíticas, se solicitó a los encuestados identificar, de acuerdo con las especies mencionadas por ellos, cuáles eran utilizadas por sus antepasados. Para cada especie, se indagó sobre la parte del vegetal empleada, el propósito del uso, y los métodos de extracción y procesamiento utilizados para la elaboración de productos derivados.

Al finalizar el período de encuestas, los datos recopilados fueron organizados y analizados mediante técnicas de estadística descriptiva.

RESULTADOS

Población Encuestada

Del total de encuestados, los que declaran haber nacido en la misma región fueron el 91% y 79% para las regiones de Coquimbo y de Atacama respectivamente. Este arraigo local les otorga una perspectiva privilegiada para identificar y relatar los cambios observados en el territorio, tanto en la vegetación nativa como en su uso a lo largo del tiempo. En relación con la identificación étnica de la población encuestada en las regiones de Coquimbo y Atacama, solo un 5,4% manifestó pertenecer a un pueblo indígena u originario, mientras que el 17,5% se identificó como parte de una comunidad agrícola. Un 76% de los encuestados no se asoció con ninguna comunidad específica.

Percepción sobre Problemas del Entorno

Al analizar los datos promedio, considerando tanto las evaluaciones de importancia como las de no importancia en ambas regiones, se observa que los factores percibidos como importantes por los encuestados son la carencia de vegetación (63%), la falta de agua potable (57%) y para riego (40%) y la escasez de lluvia (30%). En contraste, los aspectos considerados como no importantes incluyen la biodiversidad (68%), el ganado caprino (50%) y la calidad del aire (30%), tal como se detalla en la **Figura 1**.

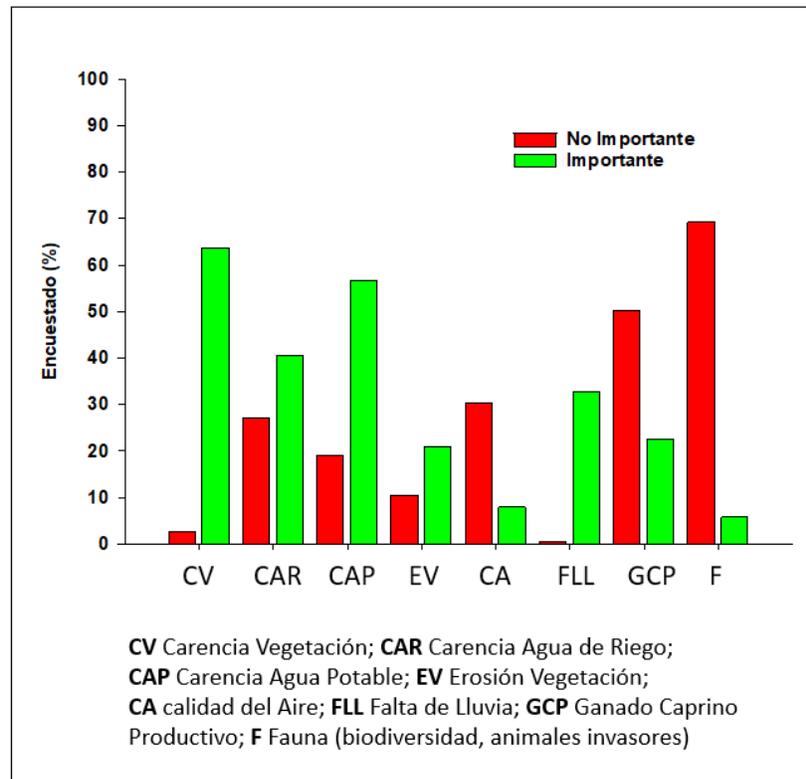


Figura 1. Percepción y conocimiento del entorno/vegetación para ambas regiones, según valoración.

Al analizar la información para cada región, se observan diferencias y similitudes, según el ámbito de análisis:

- *Carencia de vegetación:* La percepción de falta de vegetación es alta en ambas regiones, con un 77% en Atacama y más del 80% en Coquimbo, considerando el tema como medianamente importante o importante en ambas regiones.
- *Carencia de agua de riego:* En Atacama, solo el 33,8% considera la falta de agua de riego como un problema importante, pero la percepción aumenta hacia el sur, alcanzando más del 70% en Coquimbo, donde la agricultura y el pastoreo son actividades desarrolladas más ampliamente.
- *Erosión del suelo:* En Atacama, un 45% de los encuestados lo consideran medianamente importante, mientras que en Coquimbo el 50% lo percibe como un tema de poca importancia. Existe una tendencia general de mayor preocupación hacia el sur, aunque no es concluyente.
- *Calidad del aire:* La percepción de importancia es baja en ambas regiones, siendo menor en Coquimbo (39,7% lo considera no importante) en comparación con Atacama (21%). Esto podría estar relacionado con la mayor actividad minera en la región de Atacama, lo que aumenta la preocupación por la contaminación que se atribuye a dicha actividad productiva.
- *Falta de lluvia:* Este es un tema crucial para ambas regiones, con más del 50% de los encuestados considerándolo muy importante y más del 80% sumando las opciones de importancia y mediana importancia.

- *Ganado caprino*: En Atacama, solo el 16,9% lo considera importante, mientras que en Coquimbo la cifra aumenta a 28,2%. Al igual que en casos anteriores, la importancia del ganado caprino crece a medida que se avanza hacia el sur.
- *Fauna*: La fauna silvestre no se percibe como un tema relevante, con un 86% en Atacama y un 52,6% en Coquimbo que la consideran poco importante. Sólo un 1,4% en Atacama y un 10,3% en Coquimbo la consideran importante.
- *Vegetación*: En Atacama, el 58% percibe una baja cantidad de vegetación, mientras que en Coquimbo un 39,3% expresa la misma percepción. La opción de vegetación moderada es la segunda más seleccionada en ambas regiones (31% en Atacama y 38% en Coquimbo).

Usos y Mecanismo de Extracción en Base a sus Usos Ancestrales.

- *Especies, órgano y/o parte de la planta utilizada.*

En las regiones de Coquimbo y Atacama, las comunidades rurales utilizan un mayor número de especies vegetales en comparación con las comunidades indígenas. En Coquimbo, las comunidades rurales emplean 48 especies, mientras que las comunidades indígenas utilizan 39 especies; en Atacama, las cifras son de 46 y 30, respectivamente. En términos generales, la parte más utilizada de las plantas incluye hojas, frutos, tallos y troncos. Sin embargo, las comunidades indígenas presentan un menor aprovechamiento de estas partes u órganos de las plantas en comparación con las comunidades rurales. El **Cuadro 3** presenta el número de especies empleadas y las partes de las plantas utilizadas en cada caso.

Cuadro 3. Número de especies, órgano y/o parte de la planta utilizada en base al conocimiento tradicional de las comunidades indígenas y/o rurales de las regiones de Coquimbo y Atacama.

Región	Usuario	N° Especies	Corteza	Flor	Fruto	Hoja	Raíz	Ramas	Resina	Tallo	Tronco
Atacama	Comunidades indígenas	30	3	0	2	25	0	0	1	0	4
	Comunidades rurales	46	2	0	8	42	0	0	2	1	9
Coquimbo	Comunidades indígenas	39	5	1	10	16	2	1	1	6	6
	Comunidades rurales	48	5	3	13	28	3	9	1	20	3

En ambas regiones, las comunidades rurales utilizan hasta 4 diferentes órganos de una misma especie para su uso, en cambio las comunidades indígenas utilizan un máximo de 3 diferentes órganos por especies. También, en ambas regiones, las especies más utilizadas son *Azorella compacta*, *Prosopis chilensis*, *Schinus molle* y *Acacia caven*. En los **Cuadros 4 y 5** se presenta un detalle de las especies más intensamente utilizadas según las partes y/u órganos de la planta.

Cuadro 4. Órgano y/o parte de la planta utilizada por especies en la región de Atacama
(1 Tronco; 2 Tallo; 3 Resina; 4 Planta; 5 Corteza, 6 Follaje; 7 Fruto; 8 Hojas).

Usuario	Especies	Parte utilizada								
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
Comunidad indígena	<i>Azorella compacta</i>				X		X		X	
	<i>Acacia caven</i>					X			X	
	<i>Adesmia argéntea</i>	X							X	
	<i>Balbisia peduncularis</i>						X		X	
	<i>Geoffroea decorticans</i>							X	X	
	<i>Schinus molle</i>	X							X	
	<i>Senecio sp.</i>						X		X	
	<i>Spinoliva ilicifolia</i>	X				X				
	<i>Atriplex clivicola</i>								X	
	<i>Atriplex repanda</i>								X	
	<i>Balsamocarpon brevifolium</i>					X				
	<i>Brachyclados lycioides</i>								X	
	<i>Cistanthe grandiflora</i>								X	
	<i>Cortaderia rudiusscula</i>								X	
	<i>Encelia canescens</i>								X	
	<i>Ephedra chilensis</i>								X	
	<i>Euphorbia lactiflua</i>			X						
	<i>Fabiana imbricata</i>								X	
	<i>Haplopappus baylahuen</i>								X	
	<i>Helenium aromaticum</i>								X	
	<i>Heliotropium sinuatum</i>								X	
	<i>Lepechinia chilensis</i>								X	
	<i>Oxalis.sp</i>	X								
	<i>Polygonum sanguinaria</i>								X	
	<i>Prosopis chilensis</i>							X		
	<i>Senna cumingii</i>								X	
	<i>Solanum remyanum Phil</i>								X	
	<i>Stahys cabicaulis</i>								X	
	<i>Stipachrysophylla E. Des</i>								X	
	<i>Tristerix corymbosus</i>								X	
	Comunidad rural	<i>Prosopis chilensis</i>		X	X				X	X
		<i>Schinus molle</i>	X		X				X	X
<i>Acacia caven</i>						X		X	X	
<i>Adesmia argéntea</i>		X					X		X	
<i>Bulnesia chilensis</i>		X					X		X	
<i>Crameris cistoidea</i>		X			X				X	
<i>Geoffroea decorticans</i>						X		X	X	
<i>Heliotropium sinuatum</i>		X						X	X	
<i>Austrocylindropuntia miqueli</i>								X	X	
<i>Balbisia peduncularis</i>		X							X	
<i>Balsamocarpon brevifolium</i>		X							X	
<i>Cordia decandra</i>								X	X	
<i>Nolana sp</i>		X							X	
<i>Spinoliva ilicifolia</i>		X							X	
<i>Atriplex deserticola</i>									X	
<i>Atriplex gigantea</i>									X	
<i>Atriplex sp</i>									X	
<i>Azorella compacta</i>									X	
<i>Baccharis sp</i>									X	
<i>Buddleja globosa</i>									X	
<i>Cistanthe grandiflora</i>									X	
<i>Cortaderia rudiusscula</i>									X	
<i>Dysphania Ambrosioideses</i>									X	
<i>Encelia canescens</i>								X		

Usuario	Especies	Parte utilizada							
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<i>Ephedra chilensis</i>								X
	<i>Equisetum bogotense</i>								X
	<i>Eulichnia acida</i>								X
	<i>Fabiana imbricata</i>								X
	<i>Haplopappus baylahuen</i>								X
	<i>Helenium aromaticum</i>								X
	<i>Heliotropium sp</i>							X	
	<i>Larrea nítida</i>						X		
	<i>Lepechinia chilensis</i>								X
	<i>Malva sp</i>								X
	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>								X
	<i>Oxalis gigantea</i>								X
	<i>Paspalum quadrifarium</i>								X
	<i>Pleurophora pungens</i>								X
	<i>Polygonum sanguinaria</i>								X
	<i>Prosopis Alba</i>								X
	<i>Senecio sp.</i>								X
	<i>Senna cumingii</i>								X
	<i>skytanthus acutus</i>								X
	<i>Stahys cabicaulis</i>								X
	<i>Tristerix corymbosus</i>				X				
	<i>Typhaceae</i>				X				

Cuadro 5. Órgano y/o parte de la planta utilizada por especies en la región de Coquimbo. (1 Tronco; 2 Tallo; 3 Resina; 4 Ramas; 5 Raíz; 6 Planta, 7 Corteza; 8 Flor; 9 Follaje; 10 Fruto; 11 Hojas)

Usuario	Especies	Parte utilizada										
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	<i>Acacia caven</i>	X						X			X	
	<i>Adesmia argentea</i>	X	X									
	<i>Balbisia peduncularis</i>		X						X			
	<i>Brachyclados lycioides</i>											X
	<i>Buddleja globosa</i>											X
	<i>Cestrum parqui</i>											X
	<i>Cordia decandra</i>				X							
	<i>Echinopsis chilensis</i>									X		
	<i>Ephedra chilensis</i>											X
	<i>Escallonia illinita</i>											X
	<i>Eulichnia acida</i>	X	X							X		
	<i>Fabiana imbricata</i>									X	X	
Comunidad indígena	<i>Geoffroea decorticans</i>									X		
	<i>Haplopappus</i>											X
	<i>Haplopappus baylahuen</i>											
	<i>Heliotropium sinuatum</i>		X									
	<i>Lepechinia chilensis</i>											X
	<i>Lithraea caustica</i>	X					X					
	<i>Malva sp</i>											
	<i>Maytenus boaria</i>											X
	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>									X	X	
	<i>Myrcianthes coquimbensis</i>									X		
	<i>Oxalis.sp</i>	X	X									
	<i>Pasithea coerulea</i>						X					
	<i>Peumus boldus</i>											X
	<i>Pleurophora pungens</i>											X
	<i>Polygonum sanguinaria</i>											X

Usuario	Especies	Parte utilizada										
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
	<i>Porlieria chilensis</i>							X				
	<i>Pouteria splendens</i>		X									
	<i>Prosopis chilensis</i>			X							X	
	<i>Puya berteroniana</i>					X						
	<i>Puya chilensis</i>					X					X	
	<i>Quillaja saponaria</i>							X				X
	<i>Schinus molle</i>										X	X
	<i>Schinus polygamus</i>											X
	<i>Senecio sp.</i>											X
	<i>Senna cumingii</i>								X			
	<i>Spinoliva ilicifolia</i>	X										
	<i>Tristerix corymbosus</i>						X					
	<i>Acacia caven</i>	X	X		X			X			X	
	<i>Adesmia argentea</i>		X		X							
	<i>Atriplex repanda</i>											X
	<i>Austrocylindropuntia miqueli</i>										X	
	<i>Balbisia peduncularis</i>		X		X							
	<i>Brachyclados lycioides</i>											X
	<i>Buddleja globosa Hope</i>											X
	<i>Casalpinia spinosa</i>										X	
	<i>Cestrum parqui</i>											X
	<i>Cheilanthes hypoleuca</i>											X
	<i>Colliguaja odorifera</i>				X							X
	<i>Cordia decandra</i>				X				X			
	<i>Crameris cistoidea</i>				X	X					X	
	<i>Dysphania Ambrosioideses</i>											X
	<i>Echinopsis chilensis</i>										X	
	<i>Ephedra chilensis</i>		X		X							X
	<i>Erodium moschatum</i>											X
	<i>Escallonia pulverulenta</i>											X
	<i>Eulichnia acida</i>										X	X
	<i>Fabiana imbricata</i>		X									X
	<i>Geoffroea decorticans</i>										X	
	<i>Haplopappus</i>		X				X					X
	<i>Haplopappus baylahuen</i>		X									X
	<i>Heliotropium sinuatum</i>		X						X			X
	<i>Lepechinia chilensis</i>		X									X
	<i>Lithraea caustica</i>	X						X				
	<i>Luma apiculata</i>		X									
	<i>Marrubium vulgare</i>		X									
	<i>Maytenus boaria</i>											X
	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>											X
	<i>Myrcianthes coquimbensis</i>										X	
	<i>Peumus boldo</i>											X
	<i>Pleurophora pungens</i>		X									
	<i>Polygonum sanguinaria</i>		X									X
	<i>Porlieria chilensis</i>		X					X				X
	<i>Prosopis chilensis</i>	X		X	X						X	
	<i>Proustia cuneifolia</i>											X
	<i>Puya berteroniana</i>					X						
	<i>Puya chilensis</i>		X			X					X	
	<i>Quillaja saponaria</i>							X				
	<i>Schinus molle</i>		X		X						X	X
	<i>Schinus polygamus</i>											X
	<i>Senecio sp.</i>		X									X
	<i>Senna cumingii</i>		X						X		X	X
	<i>Senna sp</i>							X				
	<i>Silybum marianum</i>		X								X	
	<i>Spinoliva ilicifolia</i>		X									X
	<i>Tristerix corymbosus</i>							X				X

- *Uso de las especies en base al conocimiento.*

Independientemente de la comunidad y la región, los principales usos otorgados por las formaciones xerofíticas incluyen el uso medicinal, alimento para animales, alimento humano y leña/carbón. Sin embargo, existen diferencias en el número de especies empleadas entre las comunidades indígenas y rurales. En la región de Atacama, las especies más utilizadas son *Schinus molle* y *Geoffroea decorticans*, empleadas principalmente para alimento humano, leña, cercos vivos, teñido y usos medicinales. En cambio, en la región de Coquimbo, las especies más utilizadas son *Eulychnia acida* y *Prosopis chilensis*, destinadas principalmente a alimento humano, alimento animal, cercos vivos, leña, higiene y medicina (**Cuadro 6 y Cuadro 7**).

Cuadro 6. Uso de las especies en la Región de Atacama por las Comunidades indígenas y rurales. (1 Alimento animal; 2 Alimento humano; 3 Construcción; 4 Cosmético; 5 Higiene; 6 Combustible; 7 Medicina; 8 Tóxico)

Usuario	Especie	Usos								
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	
Comunidad indígena	<i>Acacia caven</i>	x					x			
	<i>Adesmia argentea</i>	x					x	x		
	<i>Atriplex clivicola</i>	x								
	<i>Atriplex repanda</i>	x								
	<i>Azorella compacta</i>	x							x	
	<i>Balbisia peduncularis</i>	x							x	
	<i>Balsamocarpon brevifolium</i>						x			
	<i>Brachyclados lycioides</i>								x	
	<i>Cistanthe grandiflora</i>								x	
	<i>Cortaderia rudiusscula</i>	x								
	<i>Encelia canescens</i>								x	
	<i>Ephedra chilensis</i>	x							x	
	<i>Euphorbia lactiflua</i>									x
	<i>Fabiana imbricata</i>								x	
	<i>Geoffroea decorticans</i>	x	x						x	
	<i>Haplopappus baylahuen</i>	x							x	
	<i>Helenium aromaticum</i>	x							x	
	<i>Heliotropium sinuatum</i>								x	
	<i>Lepechinia chilensis</i>								x	
	<i>Oxalis.sp</i>							x		
	<i>Polygonum sanguinaria</i>								x	
	<i>Prosopis chilensis</i>	x	x						x	
	<i>Schinus molle</i>		x			x	x	x		
	<i>Senecio sp.</i>								x	
	<i>Senna cumingii</i>		x						x	
	<i>Solanum remyanum</i>						x			
<i>Spinoliva ilicifolia</i>							x			
<i>Stahys cabicaulis</i>	x									
<i>Stipa chrysophylla</i>	x									
<i>Tristerix corymbosus</i>								x		
Comunidad rural	<i>Azorella compacta</i>	x								
	<i>Cortaderia rudiusscula</i>	x								
	<i>Acacia caven</i>	x	x				x			
	<i>Adesmia argentea</i>	x					x	x		
	<i>Atriplex deserticola</i>	x	x							
	<i>Atriplex gigantea</i>	x								
	<i>Atriplex sp</i>	x	x							
	<i>A. miqueli</i>	x						x		
	<i>Baccharis sp</i>							x		
	<i>Balbisia peduncularis</i>							x		

Usuario	Especie	Usos							
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<i>Balsamocarpon brevifolium</i>				x		x		
	<i>Buddleja globosa</i>							x	
	<i>Bulnesia chilensis</i>	x	x				x		
	<i>Cistanthe grandiflora</i>	x						x	
	<i>Cordia decandra</i>	x							
	<i>Crameria cistoidea</i>	x						x	
	<i>Dysphania Ambrosioideses</i>							x	
	<i>Encelia canescens</i>	x						x	
	<i>Ephedra chilensis</i>	x						x	
	<i>Equisetum bogotense</i>							x	
	<i>Eulichnia acida</i>	x							
	<i>Fabiana imbricata</i>						x		
	<i>Geoffroea decorticans</i>	x	x				x	x	
	<i>Haplopappus baylahuen</i>	x						x	
	<i>Helenium aromaticum</i>	x						x	
	<i>Heliotropium sinuatum</i>	x					x	x	
	<i>Heliotropium sp</i>	x							
	<i>Larrea nitida</i>							x	
	<i>Lepechinia chilensis</i>							x	
	<i>Malva sp</i>	x							
	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>							x	
	<i>Nolana sp</i>	x							
	<i>Oxalis gigantea</i>	x							
	<i>Paspalum quadrifarium</i>	x							
	<i>Pleurophora pungens</i>							x	
	<i>Polygonum sanguinaria</i>							x	
	<i>Prosopis Alba</i>	x							
	<i>Prosopis chilensis</i>	x	x					x	
	<i>Schinus molle</i>	x					x	x	
	<i>Senecio sp.</i>							x	
	<i>Senna cumingii</i>	x						x	
	<i>skytanthus acutus</i>	x						x	
	<i>Spinoliva ilicifolia</i>	x					x		
	<i>Stahys cabicaulis</i>	x							
	<i>Tristerix corymbosus</i>							x	
	<i>Typhaceae sp</i>				x				

Cuadro 7. Uso de las especies en la Región de Coquimbo por las Comunidades indígenas y rurales. (1 Alimento animal; 2 Alimento humano; 3 Cerco vivo; 4 Herramientas; 5 Higiene; 6 combustible; 7 Medicina; 8 Teñido)

Usuario	Especie	Usos							
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Comunidad indígena	<i>Eulichnia acida</i>		x	x			x	x	x
	<i>Acacia caven</i>	x	x				x	x	
	<i>Quillaja saponaria</i>					x	x	x	x
	<i>Cestrum parquii</i>	x	x						x
	<i>Prosopis chilensis</i>	x	x						x
	<i>Adesmia argentea</i>							x	x
	<i>Brachyclados lycioides</i>			x					x
	<i>Fabiana imbricata</i>			x					x
	<i>Portleria chilensis</i>						x	x	
	<i>Puya chilensis</i>		x	x					
	<i>Schinus molle</i>			x					x
	<i>Senecio sp.</i>							x	x
	<i>Balbisia peduncularis</i>								x
	<i>Buddleja globosa</i>								x

Usuario	Especie	Usos							
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<i>Echinopsis chilensis</i>		x						
	<i>Ephedra chilensis</i>							x	
	<i>Escallonia illinita</i>							x	
	<i>Geoffroea decorticans</i>		x						
	<i>Haplopappus</i>		x						
	<i>Haplopappus baylahuen</i>	x							
	<i>Heliotropium sinuatum</i>							x	
	<i>Lepechinia chilensis</i>							x	
	<i>Lithraea caustica</i>						x		
	<i>Malva sp</i>						x		
	<i>Maytenus boaria</i>		x						
	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>		x						
	<i>Myrcianthes coquimbensis</i>							x	
	<i>Oxalis. sp</i>							x	
	<i>Pasithea coerulea</i>	x							
	<i>Peumus boldus</i>							x	
	<i>Polygonum sanguinaria</i>							x	
	<i>Pouteria splendens</i>						x		
	<i>Puya berteroniana</i>		x						
	<i>Schinus polygamus</i>							x	
	<i>Senna cumingii</i>						x		
	<i>Spinelva ilicifolia</i>						x		
	<i>Tristerix corymbosus</i>							x	
	<i>Cordia decandra</i>								
	<i>Pleurophora pungens</i>								
	<i>Prosopis chilensis</i>	x	x				x	x	
	<i>Acacia caven</i>	x	x				x		
	<i>Eulichnia acida</i>	x	x					x	
	<i>Haplopappus</i>	x	x					x	
	<i>Porlieria chilensis</i>	x					x	x	
	<i>Senna cumingii</i>	x	x					x	
	<i>Adesmia argétea</i>						x	x	
	<i>Cestrum parquii</i>	x						x	
	<i>Colliguaja odorifera</i>	x					x		
	<i>Cordia decandra</i>						x	x	
	<i>Crameris cistoidea</i>							x	x
	<i>Fabiana imbricata</i>	x						x	
	<i>Heliotropium sinuatum</i>	x						x	
	<i>Lithraea caustica</i>	x					x		
	<i>Litrea caustica</i>						x	x	
	<i>Puya chilensis</i>		x					x	
	<i>Quillaja saponaria</i>					x	x		
	<i>Schinus molle</i>	x						x	
	<i>Atriplex repanda</i>	x							
	<i>A. miqueli</i>		x						
	<i>Balbisia peduncularis</i>							x	
	<i>Brachyclados lycioides</i>							x	
	<i>Buddleja globosa</i>							x	
	<i>Casalpinia spinosa</i>	x							
	<i>Cheilanthes hypoleuca</i>							x	
	<i>Dysphania Ambrosioideses</i>							x	
	<i>Echinopsis chilensis</i>		x						
	<i>Ephedra chilensis</i>							x	
	<i>Erodium moschatum</i>	x							
	<i>Escallonia pulverulenta</i>								x
	<i>Geoffroea decorticans</i>		x						
	<i>Haplopappus baylahuen</i>							x	
	<i>Lepechinia chilensis</i>							x	
	<i>Luma apiculata</i>							x	
	<i>Maitenus boaria</i>		x						

Comunidad rural



Usuario	Especie	Usos							
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<i>Marrubium vulgare</i>								X
	<i>Muehlenbeckia hastulata</i>								X
	<i>Myrcianthes coquimbensis</i>								X
	<i>Pleurophora pungens</i>								X
	<i>Polygonum sanguinaria</i>								X
	<i>Proustia cuneifolia</i>	X							
	<i>Puya berteroniana</i>		X						
	<i>Schinus molle</i>								X
	<i>Senecio sp.</i>								X
	<i>Senna sp.</i>						X		
	<i>Silybum marianum</i>								X
	<i>Spinelva ilicifolia</i>								X
	<i>Tristerix corymbosus</i>								X
	<i>Peumus boldus</i>			X					

- Método de extracción del material vegetal.

Los encuestados describieron cuatro métodos de extracción del material vegetal: hacha, extracción manual, motosierra y ramoneo del ganado. Los más utilizados fueron la extracción manual y el ramoneo. Cabe mencionar que ambos métodos fueron mencionados como no destructivos (**Cuadro 8**).

Cuadro 8. Método de extracción en base al conocimiento tradicional de las comunidades indígenas y/o rurales de cada Región.

Región	Usuario	Número de especies	Hacha	Manual	Motosierra	Ramoneo
Atacama	Comunidades indígenas	30	0	25	0	12
	Comunidades rurales	46	1	32	0	28
Coquimbo	Comunidades indígenas	39	0	34	0	3
	Comunidades rurales	48	4	45	1	5

DISCUSIÓN

Los resultados revelan que los habitantes de ambas regiones estudiadas siguen dependiendo del medio natural y poseen un gran entendimiento de las propiedades de la vegetación de la zona que habitan y un amplio conocimiento de su entorno. Este conocimiento incluye la capacidad para identificar zonas con vegetación conservada y áreas específicas para la recolección especialmente de frutos y hojas.

En el sector norte de la Región de Atacama, se registra un menor número de especies útiles, posiblemente debido a la baja diversidad de especies y al deterioro del territorio causado por la desertificación y cambio climático, lo que limita la disponibilidad de recursos y las áreas de recolección. Este estudio permitió identificar el uso de 47 especies de flora xerofítica en la Región de Atacama y 49 en la Región de Coquimbo, contribuyendo al conocimiento de la flora regional y sus usos tradicionales. Entre las especies utilizadas, se identificaron entre 30 y 48 respectivamente como frágiles, según las percepciones de las comunidades recogidas en encuestas y grupos focales. Este trabajo no solo amplía el registro de especies utilizadas, sino que también refuerza los hallazgos previos sobre el uso y la gestión de la flora en estas regiones.

Respecto al aprovechamiento de la flora multiuso, los resultados indican que los habitantes de las regiones de Coquimbo y Atacama poseen un amplio conocimiento del entorno natural que los rodea, acompañado

de una amplia diversidad de formas tradicionales de utilización de las especies que componen las formaciones xerofíticas en sus territorios. Este conocimiento se refleja en la identificación de las partes aprovechadas, los métodos de extracción, las formas de uso, las temporadas de aprovechamiento y los hábitats asociados. Dicho acervo ecológico y biológico ha sido acumulado a lo largo del tiempo mediante un proceso de aprendizaje continuo, transmitido por medios orales y demostrativos y perfeccionado a través del ensayo y error. Entre las partes más utilizadas de las especies destacan los troncos, seguidos por las ramas, frutos y hojas. El uso de troncos está estrechamente relacionado con la producción de madera para la construcción de casas, cercos, leña, carbón e instrumentos de trabajo, lo que genera un impacto destructivo significativo. Por otro lado, los frutos, semillas y hojas representan fuentes clave de alimento tanto para consumo humano como para el ganado. El aprovechamiento múltiple de las especies vegetales constituye una práctica común en estas comunidades, reflejando un manejo diversificado de los recursos disponibles.

La pauta utilizada para determinar el nivel de vulnerabilidad de la flora, estuvo basada en la susceptibilidad de producir algún nivel de daño a los individuos de las diversas especies aprovechadas y su capacidad de revertir dicho impacto. De tal forma que esta investigación mide el riesgo de afectación local o regional de las especies aprovechadas; por ejemplo, cuando se utiliza el tronco de los árboles, se pone en riesgo a los individuos de la especie, lo cual puede ser contrarrestado por la capacidad de rebrote o abundancia de la especie. Por otra parte, cuando se aprovechan las hojas difícilmente la planta está en riesgo, particularmente cuando éstas son para uso medicinal, donde la cantidad extraída es muy baja. Asimismo, aunque alguna especie sea aprovechada en su totalidad, si ésta tiene amplia distribución y alta abundancia o bien sea cultivada, esto favorece la permanencia y baja su nivel de vulnerabilidad (Ej. Chañar, algarrobo, pimienta). Lo anterior se ve reforzado al indagar el método de extracción, el cual presenta bajo uso de hacha y motosierra.

Cabe mencionar el papel primordial que juega el habitante de cada localidad, quien aporta con su conocimiento para asignar un valor de vulnerabilidad a cada una de las especies multiusos registradas localmente. Por ejemplo, reconocen cuando una especie puede tener un alto grado de vulnerabilidad y al mismo tiempo, reconocen otras con la capacidad de absorber dicho impacto (abundancia, amplia distribución, capacidad de rebrote, fructificación a lo largo del año o actividades de manejo), algo no evaluado directamente en las encuestas o grupos focales, pero si registrado en conversaciones particulares.

La recolección de especies para uso de madera (construcción, leña y carbón), como práctica usual para satisfacer necesidades básicas, ha ocasionado que algunas especies silvestres, entre ellas algarrobillas, algarrobo, chañar, adesmía, alcancen altos niveles de vulnerabilidad por aprovechamiento. En este sentido se podría decir que el habitante, mediante el aprovechamiento de sus recursos, puede representar una amenaza o una oportunidad para la formación xerofítica, en función de la intensidad y formas del aprovechamiento, así como la capacidad de respuesta al aprovechamiento.

Este trabajo ha evaluado a través de encuestas y grupos focales el grado de vulnerabilidad de los recursos de manera local, lo cual sumado a estudios ecológicos poblacionales de las especies constituyentes de las formaciones xerofíticas (Ej. abundancia, distribución, riqueza) podrían ser utilizadas para estructurar planes de manejo que permitan su conservación.

Dadas las condiciones climáticas actuales y el nivel de dependencia de la comunidad respecto de los recursos vegetales para satisfacer sus necesidades, conocer el grado de vulnerabilidad de cada especie puede ser un indicador de alerta para identificar las especies sobre las cuales se requiere poner atención local o regionalmente. Por otro lado, como en este estudio no se recogió métrica de abundancia de las especies, los resultados muestran sus limitaciones en este sentido. Por lo mismo, se hace mención que el grado de vulnerabilidad trabajado, solamente nos permite detectar el impacto del aprovechamiento de manera local y no corresponde a los índices de amenaza establecidos por otras normas como la Clasificación según estado de conservación (Decreto N° 29 de 2011 del Ministerio del Medio Ambiente que dictó el nuevo Reglamento para Clasificar Especies según Estado de Conservación, denominado con la sigla RCE).

Sin embargo, la información generada sienta bases para el manejo de los recursos y puede servir de guía para las agencias del gobierno, instituciones académicas y el sector productivo, y de esta manera contar con un amplio rango de opciones para el aprovechamiento de especies nativas, que favorezca tanto la producción de bienes y servicios, como la conservación del hábitat y la biodiversidad.

CONCLUSIONES

En ambas regiones, las comunidades mantienen una marcada dependencia del entorno natural, lo que ha permitido el desarrollo de un conocimiento profundo sobre las propiedades de la flora local y una comprensión integral de su entorno. Este conocimiento incluye la capacidad de identificar y distinguir áreas específicas para la recolección de recursos, como frutos, hojas y madera, reflejando una adaptación cultural y ecológica al paisaje xerofítico.

La vegetación xerofítica desempeña un papel crucial en las actividades cotidianas de las comunidades, siendo utilizada principalmente con fines medicinales, como alimento tanto para animales como para humanos, y como fuente de leña y carbón. En este contexto, más del 50% de los encuestados en ambas regiones identificaron problemas como la falta de vegetación, la escasez de agua potable, las bajas precipitaciones y el avance de la desertificación como desafíos críticos que afectan a las comunidades locales. En contraste, más del 50% de los encuestados no consideran al ganado caprino ni a la fauna como elementos prioritarios en la problemática regional.

En la Región de Atacama, las especies más utilizadas son *Schinus molle* y *Geoffroea decorticans*, valoradas principalmente por su utilidad en la alimentación humana, producción de leña, cercos vivos, teñido y medicina tradicional. La frecuencia y diversidad de estos usos respaldan su idoneidad como especies prioritarias en programas agroforestales, dado su aporte multifuncional y su adaptación a las condiciones locales. Por otro lado, en la Región de Coquimbo, destacan *Eulychnia acida* y *Prosopis chilensis*, que se emplean para diversos fines, como alimento humano y animal, cercos vivos, leña, higiene y medicina. Ambas especies, al mismo tiempo de su amplio uso, tienen amenazas a su conservación, en el caso de *Eulychnia acida* causadas por su largo ciclo de vida, aumento de patógenos, daño antrópico y cambio climático y en el caso de *Prosopis chilensis* las amenazas son por la intensidad de uso, eliminación del hábitat que comparte con agricultura de exportación. La combinación de su uso intensivo y amenazas significativas a la conservación, resaltan la necesidad de impulsar iniciativas de investigación aplicada que aborden ambos problemas de manera simultánea, centrándose en el desarrollo de estrategias de manejo sostenible, conservación de hábitats clave y mitigación los efectos adversos asociados al cambio climático y la actividad humana, promoviendo así la compatibilidad entre el aprovechamiento de los recursos y la conservación de estas especies clave.

En relación con los mecanismos de extracción, los encuestados describieron cuatro principales: hacha, extracción manual, motosierra y ramoneo por parte del ganado. Los resultados evidencian una variedad de técnicas, en su mayoría de carácter artesanal. Esta diversidad de prácticas subraya la necesidad de estudiar y establecer metodologías de extracción de bajo impacto que minimicen los efectos negativos sobre las plantas. Es necesario desarrollar estrategias que prevengan problemas posteriores como deformaciones estructurales, infecciones o la disminución del vigor en las especies más utilizadas, especialmente aquellas que se encuentran en estado de amenaza. Estas medidas permitirán compatibilizar el uso sostenible de los recursos vegetales con la conservación de los ecosistemas xerofíticos.

Los órganos vegetales más utilizados incluyen las hojas, frutos, tallos y troncos, cada uno con aplicaciones específicas que responden a las necesidades de las comunidades. Estos patrones de uso reflejan un manejo multifuncional de las especies vegetales, destacando tanto la riqueza del conocimiento empírico ecológico local como los desafíos asociados a la sostenibilidad de estos recursos.

Tales recursos reflejan un amplio panorama de oportunidades para desarrollar actividades económicas sostenibles, permitiendo simultáneamente la conservación del recurso y su uso sustentable. Estos

productos tienen el potencial de contribuir al desarrollo económico y multidimensional de las comunidades rurales e indígenas de las regiones de Atacama y Coquimbo, fortaleciendo su bienestar y resiliencia frente a desafíos ambientales y sociales.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue desarrollada gracias al proyecto Financiado por el Fondo de Investigación del Bosque Nativo (FIBN) 025/2018 “Generación de Información para los Bienes y Servicios de las formaciones xerofíticas de la Región de Atacama y Coquimbo” y el Programa de Restauración de Ecosistemas de alto valor ecológico financiado por el Ministerio de Agricultura. Se agradece a Jaime Montenegro e Ismael Jimenez por su apoyo en las actividades desarrolladas en terreno, y a Leonardo Cifuentes y Marcelo Rosas como revisores del escrito.

REFERENCIAS

- Barrena, J., Nahuelhual, L., Báez, A., Schiappacasse, I., Cerda, C. (2014).** Valuing cultural ecosystem services: agricultural heritage in Chiloé island, southern Chile. *Ecosystem Services*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.12.005>
- Butchart, S.H., Walpole, M., Collen, B., Van Strien, A., Scharlemann, J.P., Rosamunde, A.E., Baillie, J.E., et al. (2010).** Global Biodiversity: Indicators of Recent Declines. *Science*, Vol. 328. Pp: 1164-1168. <https://doi.org/10.1126/science.1187512>
- Castañeda, A.C. (2014)** Diseño de una metodología para evaluar el estado de los servicios ecosistémicos (tesis de especialización). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- De la Barrera, F., Bachmann-Vargas, P. & Tironi, A. (2015).** La investigación de servicios ecosistémicos en Chile: una revisión sistemática. *Investigaciones Geográficas: Una Mirada desde el Sur*, N° 50. Pp: 3-18. <https://doi.org/10.5354/0719-5370.2015.41171>
- FORECOS. (2014).** Informe final de consultoría Recopilación de Información de Indicadores de Servicios Ecosistémicos a Nivel Nacional e Internacional. Ministerio de Medio Ambiente, Chile.
- Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C (2018).** Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativas, cualitativa y mixta, Ciudad de México, México: Editorial Mc Graw Hill Education, Año de edición: 2018, ISBN: 978-1-4562-6096-5, 714 p.
- Instituto Nacional de Estadística Chile. (2018).** Síntesis de resultados censo 2017. Instituto Nacional de Estadísticas. Santiago. 26 p. En: https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/censo-de-poblacion-y-vivienda/publicaciones-y-anuarios/2017/publicaci%C3%B3n-de-resultados/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf?sfvrsn=1b2dfb06_6
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., Soto, D. et al. (2009).** Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management*, N° 258. Pp: 415-424. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.004>
- Nahuelhual, L., Donoso, P., Lara, A., Núñez, D., Oyarzún, C. & E. Neira. (2007).** Valuing ecosystem services of Chilean temperate rainforests. *Environment, Development and Sustainability*, N° 9. Pp: 481-499. <https://doi.org/10.1007/s10668-006-9033-8>
- Nahuelhual, L., Lattera, P., Carmona, A., Burgos, N., Jaramillo, A., Barral, P., Mastrángelo, M., Villarino, S. (2013).** Evaluación y mapeo de servicios ecosistémicos: Una revisión y análisis de enfoques metodológicos. En: Lara, A., Lattera, P., Manson, R., Barrantes, G. (Eds.). *Servicios ecosistémicos hídricos: estudios de caso en América Latina y el Caribe*. Valdivia, Chile. Red Pro Agua CYTED, Imprenta América. 312 p.

- Nahuelhual L., P. Laterra, S. Villarino, M. Mastrangelo, A. Carmona, A. Jaramillo, P. Barral, and N. Burgos. (2015).** Mapping of ecosystem services: missing links between purposes and procedures, *Ecosystem Services* 13:162-172. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.03.005>
- Oyarzún, C., Nahuelhual, L. & Núñez, D. (2005).** Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 20(3)-21 (1): 88-95.
- Pliscoff, P., Simonetti, J., & Asmussen, M. (2019).** Protocolo para la evaluación del riesgo de colapso de los ecosistemas: Caso de estudio del bosque espinoso (espinal) en la zona central de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, N° 73. Pp: 29-56. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022019000200029>
- Santander, A. (2003).** Norte chico (Chile). Consumo de combustibles en el procesamiento de los minerales de cobre y su impacto sobre los recursos arbóreos y arbustivos: 1601 - 1900. En: Livenais, P. & Aranda, X. (Eds.). *Dinámica de los ecosistemas agrarios en Chile árido: La Región de Coquimbo*. IRD Editions. Marseilla, France. 502 p. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.24920>.
- Squeo, F., Arancio, G., & Gutiérrez, J. (2008).** Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su conservación: Región de Atacama. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. 456 p.
- Squeo, F., Arancio, G. & Gutiérrez, J. (2001).** Libro rojo de la flora nativa y de los sitios prioritarios para su conservación: Región de Coquimbo. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. 372 p.



APUNTE

Resolución del Conflicto en el Sector Forestal Chileno: Una Propuesta desde la Teoría de Juegos – Abordando Resultados para una Solución Sostenible

Roberto Ipinza Carmona¹ ¹ Instituto Forestal, sede Los Ríos. Valdivia, Chile. roberto.ipinza@infor.cl.DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.632>

Recibido: 26.03.2025; Aceptado 12.04.2025.

RESUMEN

Se presenta un análisis del conflicto multifactorial que afecta al sector forestal chileno, empleando el marco teórico de la teoría de juegos para identificar los actores cruciales – empresas forestales, el Estado, comunidades locales y organizaciones no gubernamentales (ONGs) – y sus intereses divergentes. Se examina la trayectoria evolutiva del sector, caracterizada por disputas regulatorias, problemáticas de tenencia de la tierra, la ocurrencia de incendios intencionales y el creciente flagelo del robo de madera.

La aplicación de la teoría de juegos se realiza considerando horizontes temporales diferenciados: corto, mediano y largo plazo. En el corto plazo, se modelan los fenómenos de violencia y prevención de incendios forestales como instancias del dilema del prisionero, donde la cooperación emerge como la estrategia óptima, aunque inherentemente inestable sin la implementación de mecanismos externos de soporte. A mediano plazo, el análisis se centra en juegos regulatorios y de responsabilidad social empresarial, buscando la identificación de equilibrios cooperativos factibles entre el Estado, las empresas y las comunidades. Finalmente, a largo plazo, se postula la consecución de un equilibrio de Nash cooperativo, sustentado en la convergencia de intereses orientados hacia la sostenibilidad ambiental y la estabilidad económica del sector.

Sobre la base de este análisis, se proponen diversas políticas públicas destinadas a fomentar la cooperación entre los actores. Estas incluyen la formulación de un acuerdo nacional con garantías recíprocas, la actualización del marco legal vigente, el fortalecimiento de la fiscalización, la creación de mesas de resolución de conflictos y la implementación de estrategias para mitigar la radicalización de ciertos grupos ecologistas mediante acciones de aislamiento, promoción de la transparencia, cooptación de demandas legítimas y programas de educación ambiental. El objetivo primordial es la transformación del juego estratégico hacia un escenario de cooperación, donde se recompense el cumplimiento normativo y se establezcan canales de comunicación efectivos. La meta final es la consolidación de un sector forestal sostenible que genere beneficios tangibles para la economía, el medio ambiente y la sociedad chilena en su conjunto.

Palabras clave: Sector forestal chileno, resolución de conflictos, teoría de juegos.

SUMMARY

The article analyzes the conflict in the Chilean forestry sector using game theory, identifying key actors (companies, State, communities, NGOs) with diverging interests. It describes the sector's evolution, marked by regulatory disputes, land tenure issues, intentional fires, and wood theft.

Game theory is applied across short, medium, and long-term horizons. In the short term, violence and fire prevention are modeled as prisoner's dilemmas, where cooperation is optimal but unstable without external mechanisms. In the medium term, regulatory and social responsibility games are analyzed, seeking cooperative equilibria between the State, companies, and communities. In the long term, a cooperative Nash equilibrium is proposed, sustained by aligned interests towards sustainability and economic stability.



Policies are recommended to promote cooperation: a national agreement with joint guarantees, updating the legal framework, strengthening oversight, conflict resolution forums, and strategies to mitigate radical environmentalism through isolation, transparency, co-optation of legitimate demands, and environmental education. The aim is to transform the game towards cooperation, with rewards for compliance and effective communication channels. The ultimate goal is a sustainable forestry sector that benefits the economy, the environment, and society.

Key words: Chilean forestry sector, dispute resolution, game theory.

INTRODUCCIÓN

El sector forestal chileno, de reconocida trascendencia tanto en el ámbito económico como ambiental, se ve afectado por una persistente conflictividad entre diversos actores con intereses que, en su manifestación actual, presentan divergencias significativas. Empresas forestales, comunidades locales, organizaciones de la sociedad civil enfocadas en la protección del medio ambiente y el Estado interactúan en un sistema complejo, donde la gestión sostenible de los recursos naturales constituye un desafío primordial. En este intrincado escenario, la teoría de juegos emerge como un marco analítico de gran potencial para la comprensión y el abordaje de estas situaciones conflictivas, permitiendo enfocar la atención en los resultados observables del conflicto para su corrección y mitigación. Al proporcionar un instrumental matemático para modelar las decisiones estratégicas de agentes racionales, esta teoría facilita el análisis tanto de escenarios de cooperación potencial como de dinámicas caracterizadas por la competencia y la desconfianza.

El conflicto en el sector forestal chileno se presenta como un fenómeno de naturaleza multidimensional. Se identifica un juego estratégico con múltiples participantes: las empresas buscan asegurar la productividad bajo criterios de sostenibilidad, lo que requiere estabilidad operativa y legitimidad social; el Estado aspira a armonizar el desarrollo económico, la paz social y la consecución de objetivos ambientales, sujeto a las restricciones políticas que impone el cumplimiento del estado de derecho; ciertos grupos pueden buscar la alteración del statu quo a través de mecanismos de presión; las comunidades locales demandan participación y la obtención de beneficios derivados de la actividad forestal; y los estándares internacionales ejercen una influencia externa en la promoción de la sostenibilidad. Los principales desafíos identificados -seguridad, regulación, incendios forestales, actividades ilícitas y legitimidad social -se encuentran interrelacionados, lo que subraya la necesidad de comprender las interacciones estratégicas entre los actores involucrados para abordar sus manifestaciones concretas. El análisis de estas interacciones, aplicando modelos cuantitativos de teoría de juegos en diferentes horizontes temporales, se desarrollará en las secciones subsiguientes.

La teoría de juegos proporciona un marco matemático formal para analizar situaciones de interacción estratégica, donde las decisiones de un agente tienen un impacto directo en los resultados obtenidos por otros. En el ámbito económico-ambiental, esta teoría permite modelar las decisiones estratégicas de diversos actores, tales como empresas, entidades gubernamentales y comunidades, cuyos intereses pueden converger o divergir.

ANÁLISIS DEL CONFLICTO FORESTAL CHILENO

Evolución y Resultados Actuales

- *Evolución histórica del sector (1925–2023)*

El sector forestal chileno ha experimentado una transformación significativa desde una fase inicial de explotación insostenible de bosques nativos hacia un modelo basado en plantaciones industriales, históricamente incentivado por el Estado. Un hito fundacional fue la promulgación del Decreto Ley N° 656 el 17 de octubre de 1925, inspirado por el Dr. Federico Albert y el Ingeniero Agrónomo Ernesto Maldonado. Esta normativa estableció un nuevo marco legal forestal, resaltando la importancia de los bosques para la



economía nacional y para la provisión de servicios ecosistémicos cruciales, como la protección de suelos contra la erosión, la regulación hídrica y la influencia en el clima. El DL 656/1925 declaró ciertos terrenos como “forestales”, sujetos a planes de reforestación, y estableció incentivos económicos relevantes: por ejemplo, las tierras destinadas a nuevas plantaciones quedaron exentas del pago de contribuciones fiscales y municipales por un período de 10 años, y los particulares que realizaran plantaciones forestales recibían premios económicos por hectárea. Esta política pionera, considerada un incentivo clave para el desarrollo forestal, fue reforzada en 1931 con la Ley de Bosques (DFL N° 265), que amplió la exención tributaria a 30 años para aquellas plantaciones que cumplieran con requisitos específicos y acuñando el término “terrenos de aptitud preferentemente forestal”. Durante las décadas de 1930-1940, se sentaron así las bases legales para la conformación de un sector forestal moderno.

El “modelo industrial forestal” en Chile comenzó a consolidarse hacia 1939-1940, cuando el Estado creó la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) tras la Gran Depresión. CORFO impulsó por primera vez la industrialización del sector forestal, con proyectos de desarrollo que incluyeron la realización de inventarios de recursos boscosos y la promoción del uso de especies de rápido crecimiento, como el pino (*Pinus radiata*) y el eucalipto, ambas introducidas en el siglo XIX. En 1940, ya se encontraban operativos planes de fomento a la reforestación, y hacia los años 1950-1960, el Estado estableció y promovió las primeras grandes plantaciones de pino a gran escala con el objetivo de recuperar vastas áreas descubiertas y degradadas por la erosión. Al inicio de los años sesenta, ya existían 250.000 hectáreas de plantaciones de pino.

Cabe destacar la creación del Instituto Forestal de investigación en 1961 y su posterior reconocimiento oficial como un Instituto CORFO en el año 1965. Desde entonces la institución ha realizado una sostenida actividad en la cuantificación y caracterización de los recursos forestales, y un sostenido liderazgo en una variedad y cantidad de innovaciones e introducción de tecnologías.

El despegue masivo de las plantaciones forestales se produjo con la promulgación del Decreto Ley 701 de 1974, que fue establecido y posteriormente modificado en el año 1979, y finalmente en 1998. El DL 701 consolidó el modelo industrial forestal y otorgó bonificaciones significativas, a través de subsidios estatales que alcanzaban hasta el 75% de los costos de establecimiento, y exenciones tributarias para la forestación tanto con especies exóticas como nativas. No obstante, dada la mayor rentabilidad de las especies exóticas, estas predominaron en la generación de nuevos bosques plantados. Como resultado, en menos de cuatro décadas, Chile transformó vastas áreas degradadas por la agricultura, los incendios forestales y la minería en plantaciones industriales comerciales, principalmente de pino radiata y eucaliptos. Entre 1974 y 1997, la superficie plantada bajo el DL 701 creció exponencialmente, impulsando el surgimiento de grandes empresas forestales privadas.

En las décadas de 1990 y 2000, con la apertura económica, el sector forestal se consolidó como uno de los principales exportadores de Chile. A partir de 1993, se incorporó la certificación forestal internacional Forest Stewardship Council (FSC) para asegurar estándares de sostenibilidad, y en 2002 se creó la certificación nacional CERTFOR (actualmente PEFC Chile, que se traduce como Programa para el Reconocimiento de la Certificación Forestal), a través de una colaboración público-privada. En Chile, la superficie forestal certificada con PEFC alcanza aproximadamente 1.937.679 hectáreas a diciembre de 2022. Por su parte, FSC certificó 2.308.096 hectáreas de Manejo Forestal Sustentable (MFS). De esta manera, el modelo industrial forestal chileno, después de un largo proceso, quedó definido por: (1) una alta concentración de la propiedad forestal y la industria (dos empresas – Arauco y CMPC – controlan aproximadamente el 70% de las plantaciones productivas); (2) el predominio de plantaciones de rápido crecimiento destinadas a la producción de materia prima para celulosa, madera aserrada y tableros; y (3) un histórico y significativo apoyo estatal en políticas y subsidios, el cual finalizó en el año 2012, dejando a los pequeños y medianos propietarios interesados en plantar en una situación de vulnerabilidad y orfandad.

- *Contribuciones del sector forestal*

En la actualidad, el sector forestal constituye un pilar fundamental de la economía nacional y regional. En 2017, aportó aproximadamente el 1,9% del PIB de Chile (unos US\$5.196 millones), y tras un período de auge, en 2022 representó el 1,6% del PIB nacional. Si bien su participación relativa en el PIB ha experimentado una disminución respecto a sus niveles máximos (alrededor del 3% en 2008), el sector genera importantes divisas: en 2022, contribuyó con aproximadamente el 14% de las exportaciones no mineras del país. Chile se posiciona como uno de los mayores exportadores mundiales de pulpa de celulosa (7% del mercado global) y madera elaborada. El sector emplea a más de 300.000 personas (107.300 empleos directos y aproximadamente 160.500 indirectos en 2022), con un impacto significativo en las economías locales. Por ejemplo, en regiones como Los Ríos y Ñuble, la actividad forestal supera el 20% del PIB regional, actuando como el principal motor económico local.

En términos ambientales, las plantaciones forestales cubren aproximadamente 2,3 millones de hectáreas, lo que representa alrededor del 17% del total de bosques del país, mientras que el 83% restante corresponde a bosque nativo. Estas plantaciones (56% pino radiata, 37% eucaliptos, y el resto otras especies) se concentran geográficamente entre las regiones del Libertador O'Higgins y Los Lagos, con una mayor superficie en Biobío (aproximadamente 834 mil ha), La Araucanía (aproximadamente 480 mil ha), Maule (aproximadamente 437 mil ha) y Ñuble (aproximadamente 364 mil ha). Chile ha logrado, a través de estas plantaciones, importantes servicios ambientales como la captura de carbono: las masas de pino y eucalipto capturan el equivalente al 30% de las emisiones de CO₂ del país anualmente, contribuyendo a la mitigación del cambio climático, además de detener la erosión de suelos degradados por usos pasados inadecuados. Asimismo, la industria forestal ha invertido en tecnologías más limpias y en Manejo Forestal Sustentable, certificado por FSC/PEFC, que cubren aproximadamente 2 millones de ha en Chile. Socialmente, el sector dinamiza zonas rurales con encadenamientos productivos (transporte, aserraderos, puertos) y programas de responsabilidad social. No obstante, también existen percepciones negativas: grupos ciudadanos radicales y algunos menos moderados perciben a la industria como generadora de problemas ambientales y con *“una relación muy poco amistosa con la sociedad”*. Se le atribuyen conflictos por el uso de la tierra, una menor protección de los bosques nativos e inequidad en la distribución de beneficios.

Papel de los Actores Clave: Resultados de sus interacciones

- *Estado*

El Estado chileno debe desempeñar un papel dual como promotor del desarrollo forestal y garante de la sostenibilidad. Por un lado, a través del Ministerio de Agricultura, instituciones como la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y el Instituto Forestal (INFOR), que han apoyado al sector con políticas de incentivos a la reforestación, programas de fomento y programas de investigación forestal operativa, reconociendo su carácter estratégico. Por otro lado, debe responder a las demandas ambientales y sociales, fortaleciendo la institucionalidad forestal que muchos perciben como “débil” para resguardar ecosistemas y biodiversidad. El Estado actual ha intentado mediar en los conflictos en la macrozona sur mediante mesas de diálogo (Plan Buen Vivir con comunidades de origen Mapuche), mejoras a la seguridad pública frente a la violencia rural y propuestas de reforma a la Ley de Bosque Nativo. También enfrenta la tarea de modernizar la regulación: por ejemplo, ajustar la normativa de plantaciones al contexto del cambio climático (riesgo de incendios y de plagas y enfermedades forestales) y cumplir con los compromisos internacionales de carbono-neutralidad para el año 2050. En el conflicto, el Estado actúa como árbitro y agente: puede imponer restricciones (ej., moratorias de tala en ciertas áreas, exigencias ambientales), pero también brindar garantías de seguridad y apoyo (subsidios, inversión en prevención de incendios). Su objetivo es equilibrar el crecimiento económico con la sostenibilidad y la paz social, abordando así los resultados de la conflictividad.

- *Empresas forestales privadas*

Son actores económicos fundamentales, responsables de la gestión de plantaciones, la producción industrial y las exportaciones. Buscan seguridad jurídica para operar a largo plazo, minimizando las incertidumbres regulatorias o las tomas de terreno. Las dos mayores empresas (Forestales Arauco y CMPC) controlan la mayor parte de la tierra plantada y la capacidad industrial; junto a ellas hay miles de pequeños y medianos propietarios forestales y decenas de pymes madereras que procesan una amplia variedad de productos forestales, desde biomasa, astillas de madera y madera aserrada a chapas decorativas de especies nativas.

- *Organizaciones gremiales*

Entre las organizaciones gremiales destacan la Corporación Chilena de la Madera (CORMA), gremio que representa los intereses de los propietarios forestales grandes y medianos y productores industriales de productos de la madera. Dentro del contexto empresarial, también es importante explicitar la presencia de otros grupos empresariales y gremios directamente relacionados con la utilización y conservación de los bosques, como: APROBOSQUE, una Asociación Gremial de Propietarios de Bosque Nativo; PYMEMAD, una Asociación Gremial de Pequeños y Medianos Industriales de la Madera; ACOFORAG, la Asociación de Contratistas Forestales; SNF, la Sociedad Nacional Forestal; la Asociación Chilena de Biomasa, AChBIOM, el Colegio de Ingenieros Forestales (CIFAG) y finalmente la Asociación de Ingenieros Forestales por el Bosque Nativo. Con el objetivo de impulsar un cambio de actitud hacia el mundo de la madera por parte de la ciudadanía, los principales gremios se encuentran unidos a través de la agrupación Futuro Madera. Las empresas enfatizan su contribución al desarrollo (empleos, ingresos locales) y han adoptado voluntariamente estándares de certificación forestal (FSC desde 1998 y CERTFOR-PEFC desde 2002) para mejorar sus prácticas sociales y ambientales, lo que sitúa a Chile a la vanguardia en silvicultura responsable. No obstante, algunas de ellas enfrentan críticas por la alta concentración de la propiedad y por la sustitución del bosque nativo, aspecto que, si bien históricamente relevante, ya no constituye una práctica actual. Actualmente, las empresas privadas se encuentran presionadas por la crisis de seguridad: han debido invertir millones de dólares en vigilancia, guardias y tecnología para proteger sus predios, lo que incrementa sus costos operativos y reduce su competitividad. CORMA ha declarado que la situación de violencia rural e incendios intencionales ha generado una pérdida de US\$3.500 millones en aportes al PIB en 3 años, junto con la destrucción de más de 36 mil empleos en zonas forestales. A pesar de esto, las empresas manifiestan disposición al diálogo y a un “*nuevo ciclo forestal*” basado en la generación de confianza con autoridades, trabajadores y comunidades, buscando abordar los resultados de la conflictividad mediante una mayor legitimación de sus operaciones.

- *Grupos ecologistas radicales o proxis*

En la última década, han surgido grupos ambientalistas y colectivos locales que se oponen activamente a las plantaciones forestales de rápido crecimiento, llegando en algunos casos a la acción directa o al eco terrorismo. Sus motivaciones principales incluyen la defensa del bosque nativo y la denuncia de la pérdida de biodiversidad, sin considerar que las plantaciones realizadas en más de un 80% en suelos alterados y desprovistos de vegetación arbórea provocan un aumento de la biodiversidad y que por otra parte han sido precisamente las que han aliviado las presiones de “*explotación*” sobre el propio bosque nativo, toda una contradicción. Por otro lado, estos grupos atribuyen la escasez hídrica a las plantaciones de eucaliptos y pinos, y apoyan las reivindicaciones territoriales indígenas. Si bien la mayoría de las organizaciones ambientalistas (ONGs, académicos) participan mediante campañas públicas o acciones legales, facciones radicales han incurrido en actos violentos: incendios intencionales de plantaciones, quema de maquinaria forestal, sabotaje a equipos y robos organizados de madera. Estos grupos operan principalmente en la macrozona Araucanía–Biobío, muchas veces vinculados a la causa autonomista de origen Mapuche. Desde su perspectiva, las plantaciones industriales simbolizan un “*modelo forestal impuesto*” que despojó a las comunidades locales de sus tierras y agua, y por lo tanto justifican su destrucción como una forma de resistencia ecológica-política. Dada la gravedad de los atentados, su accionar ha sido calificado como “*eco terrorismo*” por parte de las comunidades rurales campesinas, comunidades de origen mapuche pacíficas y el sector empresarial. El impacto de estas acciones ha sido significativo: más de 102.000 hectáreas de

plantaciones han sido usurpadas o mantienen acceso restringido por tomas ilegales; se han registrado más de 400 atentados contra empresas y contratistas forestales; y el robo de madera a gran escala ha generado pérdidas superiores a US\$167 millones en tres años. Los ecologistas radicales, aunque minoritarios, han exacerbado el conflicto al poner en jaque la seguridad en las zonas forestales y tensionar la relación empresa-comunidades. Su rol impulsa al Estado a reforzar el orden público, pero también a atender las causas colaterales como la restauración ambiental y los reclamos de tierras, para desactivar el apoyo local a estas acciones, abordando así los resultados de su accionar.

- *Comunidades locales e indígenas*

Las comunidades rurales en áreas forestales, muchas de ellas con una alta población de origen Mapuche, se encuentran en el centro del conflicto. Por un lado, el sector forestal provee empleos, infraestructura y actividad económica en comunas que históricamente tenían pocas alternativas productivas. Por otro lado, las plantaciones a gran escala de propiedad privada han cambiado profundamente el paisaje: hoy el suelo está cubierto por una vegetación protectora; algunos pequeños propietarios arrendaron o vendieron sus tierras a empresas forestales, reduciendo la agricultura de subsistencia que practicaban en esos suelos históricamente degradados; existen quejas por sequías en esteros y pozos, atribuidas a los bosques plantados; y las comunidades de origen Mapuche reclaman que parte de esas plantaciones ocupan antiguas tierras ancestrales. La relación entre comunidades de origen Mapuche y empresas forestales ha sido en algunos sectores conflictiva por décadas – *“marcada por el conflicto, básicamente en función del territorio”* – incluyendo casos de usurpaciones y enfrentamientos con fuerzas policiales. En la actualidad, existe una división en las comunidades locales: algunas colaboran con las empresas, por ejemplo, trabajando en programas de manejo del bosque nativo financiados por estas, o en convenios de apoyo a escuelas locales y de prevención de incendios forestales, mientras que otras apoyan a grupos violentos de reivindicación territorial y rechazan la presencia de las empresas forestales. La comunidad local demanda una mayor participación en los beneficios del sector y mejores prácticas: corredores biológicos, protección de cuencas, prevención de incendios participativa y respeto cultural. Su papel en el conflicto es crítico, porque la estabilidad a largo plazo dependerá de que perciban al modelo industrial forestal como compatible con su bienestar. La ausencia de un apoyo local competente por parte de los gobiernos regionales y municipalidades facilita la ocurrencia de sabotajes o dificulta las labores de control, incluso con vecinos que no colaboran en denunciar a quienes provocan incendios. En cambio, con una comunidad integrada, con programas de empleo local y responsabilidad social efectiva, se puede trabajar para construir paz social en las localidades en conflicto, abordando directamente los resultados de la desconfianza y la falta de oportunidades.

- *Organismos internacionales de certificación*

El Forest Stewardship Council (FSC) y el estándar nacional CERTFOR Chile (PEFC) actúan como terceros neutrales que establecen reglas voluntarias de sostenibilidad. Aunque no son partes del conflicto en sí, su rol ha influido en la conducta de las empresas y las expectativas de la sociedad. La certificación FSC y PEFC exige el cumplimiento de criterios estrictos en manejo ambiental del bosque, relaciones con comunidades e indígenas y derechos de los trabajadores. La certificación CERTFOR, avalada por PEFC, cumple una función similar adaptada al contexto chileno. Estos organismos han servido como mecanismos de autorregulación: frente a presiones internacionales de boicot a productos *“no sustentables”*, las empresas buscaron estos sellos para acceder a mercados exigentes. En el conflicto interno, la certificación aporta ciertos canales de diálogo – por ejemplo, los estándares FSC obligan a consultas con comunidades locales y a la atención de sus quejas – y genera incentivos para reducir impactos en la protección de cursos de agua y la prohibición de reemplazar bosque nativo por plantaciones, entre otros. Grupos ambientalistas moderados y ONGs tienden a apoyar la certificación como herramienta de mejora continua, mientras que los grupos más radicales la consideran insuficiente (*“greenwashing”*). No obstante, la presión de los estándares internacionales sí ha llevado a cambios, como mayores áreas de bosque nativo bajo conservación dentro de predios certificados y planes relacionados con comunidades. En suma, los organismos de certificación funcionan como jugadores externos que han redefinido las *“reglas del juego”* del sector forestal chileno y están colaborando en transformar un juego de suma cero (economía vs. medio

ambiente) en un juego de suma positiva (producción con sostenibilidad), influyendo en los resultados del conflicto a través de la promoción de prácticas responsables.

Principales Focos de Conflicto: Manifestaciones y Resultados

De la interacción de los actores recién mencionados surgen varios conflictos específicos en el sector forestal chileno:

- *Restricciones regulatorias y cambios legales*

Las empresas experimentan incertidumbre ante posibles modificaciones en las normativas vigentes. La tramitación de una nueva Constitución en 2021-22 generó preocupación sobre provisiones que pudieran afectar la propiedad sobre tierras forestales o imponer mayores límites de uso. Asimismo, las discusiones para crear un nuevo DL 701 (que venció en 2012) y establecer nuevas leyes de fomento forestal han estado marcadas por tensiones: grupos ambientalistas exigen que cualquier incentivo incluya criterios estrictos que limiten la propiedad, por ejemplo, la prohibición de expandir monocultivos en zonas de alta sequía, mientras que las empresas buscan seguridad e incentivos a la forestación para pequeños y medianos propietarios, así como medidas para mitigar la pérdida de superficie plantada a causa de los incendios forestales. Otro frente regulatorio es la Ley de Bosque Nativo (20.283 de 2008), una ley que en términos generales ha demostrado ser poco efectiva debido a la burocracia asociada a su implementación. Hoy en día, las exportaciones de madera aserrada alcanzan escasamente los 10 millones de dólares, en contraste con los casi 6.000 millones de dólares que genera la actividad comercial de los bosques plantados o monocultivos de pino y eucalipto. Las empresas argumentan que enfrentar demasiadas trabas burocráticas o prohibiciones reducirá la inversión, mientras que los ambientalistas señalan que las regulaciones actuales aún son laxas. Este tira y afloja regulatorio es un conflicto latente: por ejemplo, la discusión sobre limitar la expansión de plantaciones en cuencas sobreexplotadas para proteger el agua se enfrenta a la lógica productiva de plantar en cualquier suelo de Aptitud Preferentemente Forestal para aprovechar las aguas lluvias (aguas azules). El desafío radica en equilibrar la flexibilidad para el negocio con resguardos ambientales basados en evidencia científica, lo que lamentablemente se suele soslayar, generando resultados insatisfactorios para ambas partes.

- *Seguridad jurídica y tomas de terrenos*

La estabilidad de la tenencia de la tierra es un punto crítico. En la zona de Araucanía y Biobío, comunidades de origen mapuche radicalizadas han llevado a cabo usurpaciones de predios forestales, ocupándolos como forma de presión para su restitución ancestral. Según datos de los gremios, más de 100 mil ha se encuentran afectadas por ocupaciones o con acceso restringido por amenazas. Esto ha derivado en violencia cuando las fuerzas policiales, protegiendo el estado de derecho, intentan desalojar, exacerbando el conflicto. Las empresas demandan al Estado garantizar la propiedad privada y la paz interior, pues la incertidumbre sobre eventuales expropiaciones o la permanencia de las tomas ahuyenta la inversión. La “seguridad jurídica” también se ve erosionada por la violencia rural: atentados incendiarios contra maquinaria, camiones y cosechadoras de madera, muchas veces reivindicados por grupos como la Coordinadora Arauco-Malleco (CAM). Los grupos autonomistas de origen Mapuche aluden a que las empresas forestales encarnan un modelo impuesto durante la dictadura, que despojó a su pueblo; por lo tanto, no reconocen legitimidad a la propiedad de esas tierras por parte de las empresas, aunque el modelo industrial forestal se originó en la década del 40. Este es un conflicto complejo, de raíces históricas, que trasciende el ámbito netamente ambiental para englobar demandas de supuestos derechos indígenas. La falta de resolución, y la ausencia de un estado de derecho pleno, en las reclamaciones de tierras por vía de la CONADI (Corporación Nacional de Desarrollo Indígena) u otros mecanismos, agrava la situación, y las empresas, en tanto, se han visto obligadas a establecer medidas de seguridad y buscan apoyo político para frenar la violencia, afectando significativamente los resultados operativos y económicos del sector. En síntesis, la cuestión de la propiedad de la tierra forestal es a la vez causa y consecuencia del conflicto: causa, porque la distribución actual es resultado de políticas pasadas que los movimientos independentistas cuestionan; y, en consecuencia, el conflicto empuja a revisar esa distribución mediante la presión.

- *Incendios forestales intencionales*

Chile enfrenta cada verano graves incendios forestales, un fenómeno que se ha intensificado con el cambio climático como factor de exacerbación. Si bien las plantaciones de pino y eucalipto son catalogadas como altamente inflamables, su grado de inflamabilidad, en términos científicos, no difiere significativamente de especies nativas como la quila (*Chusquea quila*). De hecho, en algunos mega incendios recientes, más del 50% del área quemada correspondió a especies nativas. Aunque la mayoría de los incendios tienen su origen en negligencias o accidentes, una proporción significativa en la zona de conflicto sur son intencionales y están asociados a sabotaje y *eco terrorismo*. Grupos radicales han incendiado bosques plantados como una forma de “dañar el capital” de las empresas; incluso, para entorpecer la acción de las brigadas, han realizado ataques armados contra brigadistas de CONAF, aviones y helicópteros extinguidores de incendios forestales, lo que ha obligado a suspender las labores de control de incendios por razones de seguridad. En los veranos 2016-2017 y 2022-2023, Chile sufrió incendios devastadores; tras estos eventos, hallazgos de acelerantes y declaraciones de responsables apuntaron a que parte fueron provocados deliberadamente en zonas de mayor conflicto. Las consecuencias son trágicas: además de pérdidas humanas y de biodiversidad, se estima que más de 700.000 hectáreas de bosques (nativos y plantados) fueron arrasadas por incendios en la última década. Esto retrasa la meta país de carbono-neutralidad y deja secuelas socioeconómicas, como la pérdida de viviendas rurales, daños a PYMEs madereras locales e incluso la pérdida de vidas humanas. El fuego se ha convertido en un arma en el conflicto, tal como sucedió en el pasado en la histórica guerra de la Araucanía – algunos lo usan para infundir temor económico, otros culpan a las empresas forestales de propagarlo por sus monocultivos inflamables –. Así, el manejo de incendios es un frente de batalla: las empresas invierten en aviones, brigadas privadas y cortafuegos; el Estado refuerza a CONAF y actualiza leyes, por ejemplo, penalizando más el uso intencional del fuego y regulando las plantaciones cercanas a zonas habitadas; los ambientalistas desde la ciudad abogan por restaurar mosaicos de bosque nativo menos inflamable. La “*guerra del fuego*” ilustra un conflicto donde todos pierden – un juego de suma negativa – y urge coordinarse para mitigarlo, abordando directamente los resultados devastadores de los incendios.

- *Robo de madera (crimen organizado)*

En el vacío dejado por un Estado de derecho debilitado en algunas áreas, han proliferado mafias dedicadas al robo de madera de bosques fiscales (parques y reservas de bosque nativo) y plantaciones privadas. Este delito consiste en talar árboles ilegalmente, generalmente de noche, y transportarlos con documentación falsa para venderlos a aserraderos informales. El conflicto denominado “*mapuche*” ha facilitado estas operaciones ilícitas, ya que en zonas “*rojas*” la policía limita su presencia y los caminos forestales quedan expuestos. Entre 2018 y 2021, el robo de madera en el sur habría ocasionado pérdidas por sobre los US\$200 millones. Las empresas denuncian que las células terroristas financian sus actividades mediante este negocio ilícito; por su parte, algunas comunidades locales toleran o participan en el robo como medio de subsistencia o protesta (“*recuperar lo nuestro*”). El Estado ha respondido creando unidades especializadas, como el “*Comando Anti Robo de Madera*” de Carabineros de Chile, y modificando leyes para endurecer las penas y fiscalizar la trazabilidad de la madera. Aun así, el robo continúa siendo un foco de tensión: las empresas forestales se sienten desprotegidas y con sobrecostos, ya que deben contratar seguridad; las autoridades enfrentan críticas por falta de control; y en sectores radicales existe un discurso de justificación, se habla de “*autotransporte de madera propia*” en territorios reivindicados. En términos de teoría de juegos, la debilidad institucional ha creado un juego donde la estrategia de robar tiene altos niveles de recompensas para los delincuentes con bajo riesgo, perjudicando a los propietarios y a un jugador ausente, el Estado, que pierde recursos fiscales y orden público. Esto representa un conflicto colateral que complejiza la búsqueda de soluciones pacíficas. La Ley 21.488, que tipifica el delito de sustracción de madera en Chile, fue publicada el 27 de septiembre de 2022 y entró en vigencia el 17 de diciembre de ese mismo año. Esta ley modifica el Código Penal y el Código Procesal Penal. Además, habilita el uso de técnicas especiales de investigación para perseguir este delito. La ley establece que quienes produzcan, vendan, almacenen o acopien troncos o trozos de madera deben cumplir con la tramitación y porte de guías de despacho electrónica. Las penas que se aplican por el delito de sustracción de madera son similares a las que se aplican por otros tipos de robos y hurtos. Además, se establece una multa de 75 a 100 Unidades

Tributarias Mensuales (UTM). En definitiva, esta ley ha tenido un resultado positivo en la disminución de este flagelo.

- *Presión ideológica y opinión pública*

Finalmente, existe un conflicto a nivel discursivo. El modelo industrial forestal chileno es el centro de un debate ideológico: desde sectores radicales, a menudo con base en la academia, se critica el monocultivo extensivo calificándolo de insustentable, extractivista y “*neocolonial*”, sin considerar la similitud con otros sistemas productivos agrícolas extensivos como el trigo, el maíz o la avena. La industria destaca que Chile es un “*modelo exitoso en el mundo*” en plantaciones, y que no forestar el millón de hectáreas disponibles sería desperdiciar una ventaja comparativa del país. Resulta paradójico que algunos grupos que se autodenominan “*ecologistas*” adopten posturas que contradicen los principios fundamentales de la ecología, al oponerse a la gestión de árboles que son capaces de fijar carbono con gran eficiencia, capturando 1 tonelada de CO₂ a un costo ocho veces menor que otros tipos de bosque.

Esta polarización se refleja en los medios de comunicación, donde frecuentemente, tras un gran incendio o un incidente de violencia, se recurre a la emocionalidad, culpando al modelo industrial forestal por su supuesta inflamabilidad o por exacerbar las tensiones sociales. La opinión pública urbana tiende a sensibilizarse en exceso con campañas ambientalistas.

La **batalla ideológica** influye en las posiciones de los actores. Políticos y legisladores reciben estas corrientes de opinión basadas en la emocionalidad y pueden inclinar las políticas según la narrativa dominante. Por ejemplo, después de un incendio, se instala la idea de que “*el monocultivo forestal es el culpable*”, lo que aumenta la probabilidad de que se endurezcan las regulaciones a las plantaciones. Las empresas, conscientes de ello, invierten en mejorar su imagen a través de campañas sobre la captura de carbono e involucrando a las comunidades en los programas de prevención de incendios forestales, mientras que ONGs ecologistas radicales presionan con informes críticos, incluso a nivel internacional, basados en información sesgada sobre biodiversidad, agua y derechos humanos para moldear la agenda. En esencia, este componente del conflicto se libra en el terreno de la *legitimidad social del modelo industrial forestal* y condiciona las posibilidades de lograr soluciones cooperativas o, por el contrario, propicias medidas unilaterales abruptas, afectando los resultados de las políticas y la percepción pública del sector.

MODELADO CUANTITATIVO CON TEORÍA DE JUEGOS: ABORDANDO LOS RESULTADOS DEL CONFLICTO

Para estructurar el análisis y enfocar la atención en la resolución de los resultados del conflicto, se modelarán las interacciones clave del sector forestal chileno en tres horizontes temporales: corto plazo (medidas inmediatas para mitigar las consecuencias), mediano plazo (estabilidad sectorial para asegurar la continuidad) y largo plazo (sostenibilidad futura para prevenir la recurrencia de resultados negativos). En cada horizonte, se identifican los jugadores principales, sus estrategias disponibles, los posibles resultados (recompensas) y los equilibrios de Nash resultantes, con el objetivo de simular escenarios y evaluar cuáles estrategias conducen a resultados óptimos (cooperativos) o de conflicto, concentrándose en la modificación de las dinámicas que generan los resultados indeseados.

Horizonte de Corto Plazo: Reducir Pérdidas Económicas y Ambientales Inmediatas (Resultados del Conflicto)

En el corto plazo, el foco se centra en detener la espiral de violencia e incendios que provoca pérdidas cuantiosas temporada tras temporada. Aquí, los jugadores críticos son el Estado y los Grupos Radicales (considerando a quienes realizan atentados/incendios). Se simplificará inicialmente el juego como una interacción Estado vs. grupo radical, dado que son quienes actúan para mantener/alterar el orden público, generando directamente los resultados de violencia y destrucción.

- Estrategias del Estado: (A) Reforzar fuertemente la seguridad y la persecución (mano dura), o (B) buscar un acuerdo de desescalada con concesiones (negociación/diálogo).
- Estrategias del grupo radical: (A) Continuar ataques incendiarios y sabotajes (escalar conflicto), o (B) cesar ataques temporalmente (tregua).

Se puede modelar esto como un juego tipo “*poli bueno/poli malo*” vs. “*continuar/replegar violencia*”. Se modelan las recompensas cualitativas de la siguiente manera: el Estado valora la reducción de la violencia, ya que evita pérdidas económicas y críticas, aunque a costa de ceder en sus principios o usar recursos que le otorga el estado de derecho; los radicales valoran causar daño a las empresas forestales y visibilizar su causa, pero arriesgan represión o perder apoyo.

En la siguiente matriz de recompensas hipotética (Juego 1), el Estado obtiene un mejor resultado si logra la paz sin ceder demasiado, y los radicales obtienen un mejor resultado si el Estado cede sin que ellos detengan la violencia:

- Si el Estado opta por negociar y los radicales decretan una tregua (Cooperación mutua): se logra una paz relativa en el corto plazo, mitigando los resultados inmediatos del conflicto. Recompensas: Estado gana estabilidad (valor +5), radicales logran ciertas concesiones (+5).
- Si el Estado reprime con dureza y los radicales igualmente cesan los ataques (Estado duro vs. Radical tregua): el Estado impone orden, pero sin abordar las causas subyacentes, lo que podría generar resultados futuros negativos. Recompensas: Estado gana estabilidad (+3), radicales pierden oportunidad de lograr algo (-1).
- Si el Estado negocia, pero los radicales engañan y continúan los ataques (Estado cede vs. Radical ataca): los radicales obtienen ventajas (mantienen la presión y quizás obtuvieron concesiones, recompensas +6), el Estado queda en una posición vulnerable (+ la violencia persiste y cedió, recompensas -3).
- Si el Estado reprime y los radicales continúan los ataques (conflicto total): escalada de violencia, pérdidas para ambos, exacerbando los resultados negativos del conflicto. Recompensas: Estado -5 por caos, radicales -5 por riesgo y aislamiento.

Analizando este juego, se puede observar similitudes con el dilema del prisionero: la estrategia agresiva (reprimir o atacar) puede parecer ventajosa individualmente dado el temor a ser explotado, pero si ambos la eligen, el resultado es el peor para todos, con violencia generalizada y pérdidas significativas. El equilibrio de Nash aquí sería “*Estado mano dura, Radicales continúan ataques*” si ambos parten de la desconfianza, eligiendo la estrategia agresiva como la mejor respuesta a la esperada agresión del otro. Ese equilibrio corresponde al escenario de conflicto total, con altas pérdidas económicas, incendios sin control, desplome de la inversión y deterioro social. En cambio, la situación óptima en el corto plazo sería “*Estado diálogo, Radicales tregua*”, que reduce inmediatamente las pérdidas y abre la vía a soluciones políticas para abordar los resultados del conflicto. Sin embargo, esa cooperación no es estable sin construir confianza: de inicio, cada uno tiene incentivos para desviarse, ya que los radicales sospechan de las promesas gubernamentales y el Estado teme que la tregua sea aprovechada por los violentistas.

- *Conclusión del modelo a corto plazo*

Sin algún mecanismo externo, como la presencia de mediadores y garantías creíbles, el equilibrio tiende a la no cooperación, perpetuando las pérdidas. Para romper este equilibrio subóptimo, el Estado debe modificar los incentivos del juego: aumentar el costo de los ataques para los radicales, lo que implica una mayor efectividad policial e inteligencia basada en el estado de derecho, y simultáneamente ofrecer canales de salida honrosos a los grupos, como programas de diálogo con las comunidades y señales de reforma, de modo que la estrategia “*tregua*” se vuelva racional para los radicales, abordando así los resultados de la violencia.

Otro juego de corto plazo involucra a Empresas vs. Estado respecto a la prevención de incendios en la próxima temporada. Ambos desean evitar incendios, pero cada uno preferiría que el otro asuma el costo principal de la prevención. Este es un juego de tipo bien público: invertir en cortafuegos y brigadas es costoso, y el beneficio, la reducción de incendios, lo comparten ambos, mitigando así sus resultados devastadores. Podríamos tener estrategias: Invertir fuertemente o No invertir más allá de lo mínimo. Si ambos invierten, la reducción de incendios beneficia a ambos, generando altas ganancias compartidas; si ninguno invierte lo suficiente, los incendios arrasan, lo que implica una gran pérdida compartida. Pero si uno invierte y el otro no, el que invirtió carga con los costos mientras el otro (“free-rider”) se beneficia gratuitamente de cierta mitigación. Este juego es análogo al dilema del prisionero cooperativo: el equilibrio de Nash no cooperativo sería que ninguno invierta lo necesario, por temor a gastar en vano, lo que resultaría en una alta incidencia de incendios. El óptimo social es que ambos cooperen invirtiendo, pero esto requiere acuerdos, por ejemplo, cofinanciar medidas de prevención. En la práctica, lo observado en Chile es un subóptimo: 35 mil ha de plantaciones se pierden anualmente y la superficie total plantada está retrocediendo, en parte debido a incendios no contenidos. Para este horizonte inmediato, el modelo indica que la cooperación (inversión conjunta en prevención) mejora los resultados para todos: menos pérdidas económicas, ya que se salvan plantaciones, y menor daño ambiental, es decir, menos emisiones. El desafío es alinear los incentivos: el Estado aprobó en 2023 una ley que obliga a las empresas a mantener cortafuegos y planes contra incendios, incluyendo a la Pyme forestal, aunque esta última medida podría generar controversia. Las empresas, por su parte, solicitan al Estado un mayor aporte en vigilancia aérea y persecución penal, lo cual no ha tenido el éxito esperado. En este punto, resulta conveniente que, especialmente el Estado, mueva el juego hacia la coordinación, es decir, “*todos invierten*” en lugar del equilibrio de pasividad, abordando así los resultados de los incendios.

En síntesis, en el corto plazo, los modelos de teoría de juegos muestran que las dinámicas actuales conducen a equilibrios deficientes o subóptimos, donde la violencia persiste y no se logra una prevención de incendios suficiente, los cuales son Nash estables dado el clima de desconfianza. Para alcanzar un escenario óptimo, donde exista paz y cooperación inmediata, se requieren intervenciones externas o compromisos creíbles para salir de esos equilibrios y abordar los resultados negativos del conflicto. En las recomendaciones se verá cómo introducir esos cambios.

Horizonte de Mediano Plazo: Garantizar la Estabilidad y Viabilidad del Sector (Abordando los Resultados de la Incertidumbre)

A mediano plazo (próximos 1 a 5 años), el objetivo es estabilizar el sector forestal, reduciendo la incertidumbre regulatoria (provocada por el Ministerio de Medio Ambiente) y de seguridad, de forma que pueda operar con normalidad y en convivencia con las comunidades. Aquí, el juego involucra a tres actores principales: Estado, Empresas Forestales y Comunidades/ONG ambientalistas (consideremos a las ONG ambientales moderadas como representantes de intereses sociales y ambientales legítimos, en contraste con los radicales). Para simplificar el análisis, se puede modelar esto como una serie de juegos bilaterales interconectados, enfocándolo en cómo sus interacciones impactan los resultados del sector.

1. *Empresas vs. Estado – Juego regulatorio*: El Estado puede optar por una regulación estricta del sector, imponiendo, por ejemplo, límites de plantación por cuenca, mayores exigencias ambientales o restringiendo la expansión de plantaciones, o, por el contrario, una regulación flexible/pro empresa, con pocas trabas e incentivos económicos directos. Las empresas, por su parte, pueden cumplir de buena fe, incluso más allá de lo exigido, adoptando altos estándares voluntarios, transparencia y colaboración con la fiscalización, o bien, buscar evadir, cumplir solo lo mínimo indispensable e incluso eludir normas si resulta rentable hacerlo. Este juego se asemeja a un modelo de agente fiscalizador (Estado) vs. agente supervisado (empresa), típico en economía ambiental. Si el Estado es estricto y la empresa cumple, se logra un equilibrio de *cumplimiento forzado* con estabilidad, lo que implica recompensas moderadas para ambos: la empresa asume costos de cumplimiento, pero gana en reputación y evita sanciones; el Estado invierte en fiscalizar, pero satisface a la ciudadanía. Si el Estado es laxo y la empresa cumple voluntariamente y más allá de la ley, se produce un *sobrecumplimiento*: las empresas incurren en costos quizás innecesarios y podrían quedar en

desventaja competitiva, lo que implica que las empresas obtienen *recompensas* ligeramente bajas, mientras que el Estado obtiene *recompensas* altas debido a la escasa conflictividad y el bajo gasto público. Si el Estado es estricto pero la empresa no cumple, es decir, intenta evadir, habrá sanciones, juicios y conflictividad, donde ambos pierden: el Estado enfrenta infracciones y la empresa arriesga el cierre o multas, generando una situación inestable. Si el Estado es laxo y la empresa además no adopta buenas prácticas, se reproduce un modelo con mínimos exigidos: en el corto plazo, la empresa maximiza ganancias (*recompensas* altas), pero se acumula resentimiento social por impactos no atendidos, lo que implica que el Estado a largo plazo obtiene *recompensas* bajas debido al conflicto latente.

El equilibrio de Nash probable en ausencia de confianza es “*Estado laxo – Empresa cumple lo justo*”, es decir, no realiza una inversión extra en sostenibilidad, porque al Estado puede faltarle capital político para medidas estrictas y la empresa, racionalmente, no gastará más de lo obligatorio. Sin embargo, ese equilibrio podría no ser estable políticamente: es vulnerable a “*shocks*”, donde un nuevo desastre ambiental podría forzar regulaciones repentinas. En cambio, “*Estado estricto – Empresa cumple*” podría ser otro equilibrio si ambas partes esperan que la otra cumpla su papel (Estado fuerte y empresas responsables). Para lograrlo, deben alinearse las expectativas: las empresas aceptarían regulaciones más fuertes si confían en que serán razonables y estables, y el Estado endurecería las reglas si confía en que las empresas no abandonarán el país, sino que cooperarán, abordando así los resultados de la incertidumbre regulatoria.

En síntesis, para el mediano plazo, lo ideal es alcanzar un equilibrio cooperativo donde la regulación sea lo suficientemente robusta y las empresas la acaten plenamente, lo que reduce la conflictividad social y brinda certeza a largo plazo. La teoría de juegos sugiere mecanismos para lograrlo: negociaciones pre-juego, como por ejemplo un pacto público-privado de “sustentabilidad forestal” donde las empresas acepten ciertas medidas a cambio de apoyo en seguridad, o la repetición del juego, donde las empresas que históricamente cumplen ganan la confianza del regulador y evitan castigos, creando una reputación mutua.

2. *Empresas vs. Comunidades/ONG – Juego de responsabilidad social*: Aquí se considera que las empresas deciden cooperar con las comunidades (incluyendo ONGs) – por ejemplo, implementando programas de desarrollo local, consultando proyectos con la gente, destinando parte de sus tierras a bosques nativos o iniciativas comunitarias – o, por el contrario, optan por una actitud de no cooperación, operando unilateralmente, defendiendo sus derechos, pero sin mayor diálogo. Las comunidades/ONG, a su vez, pueden elegir una postura de colaboración, lo que implica participar en mesas de trabajo y reconocer las mejoras de las empresas, o bien optar por una postura opuesta, de oposición frontal, donde las protestas, la judicialización de proyectos y los llamados al “*boicot*” son frecuentes. Este juego es similar a un dilema de cooperación comunitaria: si ambos lados cooperan, se genera un círculo virtuoso, donde las empresas logran licencia social y menos trabas, y las comunidades reciben beneficios e influencia, generando *recompensas* positivas para ambos. Si la empresa coopera, pero la comunidad sigue oponiéndose, debido a posibles desconfianzas, la empresa habría incurrido en costos adicionales sin lograr la paz social, la empresa se frustra y la comunidad posiblemente obtiene concesiones, pero mantiene el conflicto, es decir, una relación tensa. Si la empresa no coopera y la comunidad tampoco, se cristaliza el conflicto: protestas, denuncias internacionales e imagen negativa, donde ambos sufren: las operaciones se ven interrumpidas y la comunidad no obtiene beneficios, lo que constituye un equilibrio de confrontación. Si la empresa no coopera, pero la comunidad tratara de colaborar, este caso es poco lógico; por lo general, si la empresa ignora, la comunidad pasará a la oposición.

Actualmente, algunas relaciones empresa-comunidad en el sur de Chile se encuentran en el cuadrante de “*no cooperación mutua*”, producto de la arraigada desconfianza. El equilibrio de Nash realista es precisamente ese: ambos no colaboran, porque cada parte cree que la otra no cambiará; las empresas tradicionalmente veían a las comunidades como ajenas al negocio, y las comunidades veían a la empresa como un ente lejano o explotador. Para moverse hacia el equilibrio cooperativo, es decir, la colaboración mutua, de nuevo es necesario construir confianza de manera reiterada:

repetir el juego con interacciones positivas, como proyectos piloto exitosos en algunas comunidades, genera una reputación que puede ampliarse hacia otras comunidades. También, incentivos externos como la certificación FSC o PEFC requieren colaboración con las comunidades; esto modifica la recompensa del juego, haciendo que cooperar sea más beneficioso, pues sin colaboración, la empresa podría perder la certificación y el acceso a ciertos mercados.

En resumen, en el mediano plazo, un equilibrio deseable es aquel donde las empresas integran a las comunidades en la gestión, por ejemplo, a través de comités locales consultivos y el reparto de beneficios, y las comunidades apoyan la continuidad del sector porque perciben mejoras tangibles. De lograrse, este equilibrio “*ganar-ganar*” reduce la base social que apoya a los grupos radicales y crea resiliencia ante futuras crisis, donde los mismos vecinos protegen las plantaciones de incendios o rechazan la violencia, abordando así los resultados de la falta de colaboración.

3. *Estado vs. Comunidades/ONG – Juego político*: El Estado actúa como intermediario político. Puede apoyar activamente las demandas locales/ambientales, fortaleciendo la institucionalidad ambiental y devolviendo tierras a las comunidades, entre otros, o, por el contrario, puede priorizar la inversión y el orden, respaldando más a las empresas y conteniendo las protestas. En respuesta, las comunidades/ONG pueden mantener la protesta o, alternativamente, dar confianza al Estado. Por ejemplo, si el Estado lanza un programa de restitución de tierras y desarrollo, cooperando con las comunidades, y estas a su vez disminuyen su movilización, dando un voto de confianza, se logra una paz relativa, donde el Estado gana estabilidad y las comunidades obtienen avances concretos. Si el Estado cede y aun así las protestas continúan, aumentando las demandas, el Estado sufrirá un gran desgaste, aunque en ese caso podría revertir las medidas; si el Estado es estricto en mantener el orden y no cede, y las comunidades siguen protestando, el conflicto se traslada a los tribunales y a la prensa, y eventualmente puede forzar cambios políticos. Este juego es una suerte de juego de señalamientos: el Estado quiere evitar parecer débil, pero tampoco intransigente, y las comunidades calibran hasta dónde presionar, buscando influir en los resultados políticos.

Un equilibrio posible es que el Estado ofrezca solo cambios marginales y las ONG sigan protestando moderadamente – un punto muerto donde nada se resuelve de fondo es un equilibrio subóptimo pero estable si ningún lado ve beneficio en cambiar su postura. El óptimo sería un acuerdo amplio, como un *Pacto Social Forestal* donde el Estado implemente políticas de regulaciones simples y claras, y las comunidades acepten convivir con el sector en nuevos términos. Alcanzar eso requiere credibilidad: que el Estado muestre un compromiso real y que las ONG moderen su postura, reconociendo los avances en lugar de cambiar siempre la línea de meta, abordando así los resultados de la falta de un acuerdo político.

Integrando estos sub-juegos, el mediano plazo en su conjunto puede evaluarse mediante equilibrios de Nash en juegos de coordinación múltiples. Idealmente, queremos que todos los sub-juegos converjan a un equilibrio cooperativo: *Estado estricto, pero justo – Empresas cumplen – Comunidades cooperan*. Ese escenario significaría una regulación clara y exigente, con una seguridad jurídica ambiental, empresas internalizando buenas prácticas y comunidades sintiéndose partícipes, con el Estado arbitrando con legitimidad. Es un equilibrio de Nash multi actor en tanto ninguna de las partes tendría incentivos para desviarse unilateralmente: la empresa no tendría incentivo para romper las reglas si las demás también cumplen y el mercado premia la sostenibilidad; el Estado no relajaría las reglas porque perdería apoyo ciudadano; las comunidades no volverían a protestas violentas si están obteniendo beneficios y ven atendidas sus demandas principales.

Lograrlo requiere que durante un período todas las partes jueguen estrategias cooperativas repetidamente hasta generar confianza. La teoría de juegos enseña que la repetición y la transparencia ayudan: si todos los jugadores saben que este juego continuará por años, les conviene construir una reputación de cooperadores para seguir obteniendo ganancias en el futuro, alcanzando lo que se conoce como el “*teorema de Folk*”, donde en un juego repetido infinitamente, siempre que los jugadores sean lo suficientemente pacientes, existe un equilibrio tal que ambos jugadores cooperan en la trayectoria del equilibrio. Además, mecanismos de monitoreo, como una mesa de seguimiento con la participación de

todos, pueden detectar desvíos y sancionarlos, manteniendo así el equilibrio cooperativo y abordando los resultados de la desconfianza.

Horizonte de Largo Plazo: Políticas de Sostenibilidad y Estabilidad Económica (Previniendo Resultados Negativos a Futuro)

En el largo plazo (10+ años), es posible imaginar un escenario donde el sector forestal chileno se haya transformado para alinearse con objetivos de sostenibilidad integral y estabilidad económica a perpetuidad. Aquí consideramos a todos los actores clave (*Estado futuro, Empresas forestales, Sociedad civil, Comunidades locales e incluso los mercados internacionales*). Es un juego complejo de suma positiva: todos podrían ganar si se logra un equilibrio virtuoso entre producción, conservación y paz social; pero requiere superar las tentaciones de corto plazo y enfocarse en prevenir la recurrencia de resultados negativos.

Se puede concebir un modelo a largo plazo como un juego repetido de cooperación entre múltiples jugadores donde se alternan fases de negociación y cumplimiento. En esencia, en el largo plazo, el objetivo es alcanzar un Equilibrio de Nash cooperativo sostenido por intereses alineados. Esto suena paradójico, un Nash “cooperativo”, pero en juegos repetidos infinitos permite que estrategias cooperativas sean estables si la amenaza de castigo futuro por desviarse es suficiente para disuadir las desviaciones.

Assumiendo que se consolida una Política de Estado Forestal Sostenible, consensuada por todos. En este nuevo marco:

- Las empresas forestales diversifican su negocio integrando la restauración ecológica con base genética y los servicios ecosistémicos; ya no solo venden madera, sino también bonos de biodiversidad y de carbono, y reciben recompensas por la protección de cuencas, entre otros, alineando así su beneficio con la conservación.
- Las comunidades locales participan en la gestión a través de cooperativas o empleos verdes, y reciben rentas o *royalties* por la actividad forestal en sus territorios, por lo que tienen un incentivo económico para proteger las plantaciones junto con las empresas.
- El Estado se convierte en un garante firme: mantiene una presencia policial para atajar cualquier brote violento y disuadir el radicalismo, pero también garantiza un apoyo continuo a las comunidades (salud, educación, infraestructura) financiado en parte con los impuestos o recompensas que recibe del sector forestal.
- Los grupos ambientalistas radicales perderían base, y los moderados formarían parte de los órganos consultivos, vigilando que se cumplan los estándares como un actor vigilante pero integrado al sistema.
- Los mercados internacionales premian a Chile: por ejemplo, EE. UU. y la Unión Europea, entre otros países, solo compran productos de cadenas libres de conflicto y con certificación sostenible, beneficiando a Chile si continúa por este camino o castigándolo con aranceles si retrocede.

En tal escenario, las desviaciones individuales serían penalizadas: si una empresa decidiera maximizar ganancias a corto plazo talando un bosque ilegalmente (acción poco probable), perdería su certificación, sería multada fuertemente por el Estado y boicoteada por los compradores; claramente, su desviación no sería rentable. Si una comunidad intentara volver a protestas violentas, perdería sus beneficios, podrían cancelarse los convenios que la benefician y se enfrentaría a un Estado legítimo aplicando las normas del estado de derecho y a otras comunidades en contra, ya que pondría en riesgo el modelo que a todos beneficia. Si un Estado populista quisiera deshacer los acuerdos, por ejemplo, expropiando las empresas forestales arbitrariamente, la reacción negativa en forma de fuga de inversiones, el rechazo de las comunidades que ahora son socias del negocio y la sanción internacional harían que esa estrategia no fuera sostenible.

Así, todos los actores estarían en un equilibrio donde cooperar y mantener el pacto sería su mejor respuesta dadas las estrategias cooperativas de los demás. Este es el óptimo de Pareto¹ del conflicto forestal: la máxima ganancia económica compatible con la máxima sostenibilidad ecológica y la cohesión social. En términos de teoría de juegos, se habría transformado el juego fundamental: ya no sería un dilema del prisionero, sino un juego de coordinación/colaboración donde la estrategia “cooperar” es dominante porque las reglas del entorno, las instituciones y los mercados la hacen la más rentable para cada jugador.

Un concepto relevante es el Equilibrio de Nash de amenazas creíbles, donde el Teorema de Folk sugiere que, con suficientes rondas futuras y castigos, casi cualquier resultado cooperativo puede sostenerse como Nash en juegos repetidos. Aquí, la amenaza sería: si algún actor rompe el pacto, todos los demás responderán castigándolo o volviendo al estado de conflicto que nadie desea. Mientras esa amenaza sea creíble y el juego se repita indefinidamente (el sector forestal es renovable, con ciclos de cosecha de décadas, así que siempre hay un horizonte futuro), el equilibrio cooperativo se mantiene.

En la práctica, al proyectar 10-20 años hacia adelante, el modelo cuantitativo podría incorporar descuentos inter temporales y el valor presente neto de los flujos de *recompensas*. La cooperación se sostiene si los actores valoran suficientemente el futuro (es decir, bajas tasas de descuento), de modo que no sacrifiquen grandes beneficios futuros por ganancias cortoplacistas pequeñas. En este escenario cooperativo, las Empresas obtienen un beneficio anual estable versus un beneficio volátil y menor en un escenario conflictivo; las Comunidades reciben ingresos y una mejor calidad de vida en un escenario cooperativo versus prácticamente nada en otro de conflicto; el Estado cumple las metas de carbono y desarrollo versus nada en un escenario conflictivo. Sumando los valores, claramente la recompensa colectiva es mayor con la cooperación.

Resumiendo, el análisis de teoría de juegos indica que, si se implementan las políticas correctas para transformar la interacción, existe un equilibrio de Nash de colaboración en el largo plazo donde todos los actores estarían mejor. La dificultad radica en alcanzarlo desde la situación actual, que representa otro equilibrio, el de confrontación. Pero una vez alcanzado, podría auto preservarse, previniendo la recurrencia de resultados negativos.

ESTRATEGIAS RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

A partir del análisis teórico y del diagnóstico de la situación, se proponen las siguientes estrategias de solución y políticas, inspiradas en los principios de la teoría de juegos: incentivar la cooperación, modificar la estructura de recompensas y crear compromisos creíbles para abordar los resultados del conflicto de manera efectiva.

Políticas de Negociación y Regulación para Incentivar la Cooperación

El Estado debe asumir un rol más activo como mediador y creador de reglas. Se recomienda convocar a un “Acuerdo Nacional por el Desarrollo Forestal Sostenible”, incluyendo a empresas, comunidades, representantes de origen mapuche, ONGs y gremios laborales. En ese foro, se negociaría un “Gran Pacto” donde cada parte ceda algo a cambio de garantías, buscando modificar los resultados actuales del conflicto:

- El Estado puede ofrecer una seguridad jurídica reforzada 2.0 a las inversiones forestales, pero condicionada a que las empresas cumplan metas socioambientales. Esto se instrumentaría, por ejemplo, reactivando un nuevo DL 701 modernizado, simple y no burocrático: subsidios a la

¹ El óptimo de Pareto, también conocido como eficiencia de Pareto, es un concepto económico que describe un estado de equilibrio en el que no se puede mejorar la situación de un individuo sin perjudicar a otro.

forestación solo para quienes adopten prácticas sustentables certificadas y trabajen con pequeños propietarios. Así se alinea el incentivo económico con la cooperación, donde las empresas cooperan con el entorno para recibir el beneficio.

- Actualizar el marco legal con la participación de todos: una Ley Marco Forestal que unifique aspectos productivos y de conservación, dándole rango legal a ciertos compromisos voluntarios, por ejemplo, incorporar los estándares FSC o PEFC como obligatorios gradualmente, para simplificar la burocracia del Estado chileno. Al participar las ONGs moderadas en su diseño, se sentirán copartícipes y tendrán menos incentivos para boicotear los acuerdos, lo que impactará positivamente en los resultados de la implementación.
- Fortalecer el Servicio Nacional Forestal autónomo, propuesta ya en discusión, con mayor presupuesto para fiscalización y prevención de incendios. Esto mejora la capacidad de hacer cumplir las reglas del juego, es decir, asegura que en el juego regulatorio la estrategia “no cumplir” tenga un costo alto, modificando las recompensas y los resultados de la actividad. Simplificar la legislación vigente, los planes de manejo, eliminando las burocracias y fomentando la cooperación entre propietarios, enfocado en el principio KISS (Keep It Simple Stupid), que es mantener las cosas lo más simple posible.
- Implementar mesas locales de resolución de conflictos: espacios regulares en provincias forestales donde empresas, comunidades, autoridades locales y policía se reúnan para atender reclamos antes de que escalen. La sola existencia de este canal cambia la dinámica del juego con las comunidades: en vez de ir directo a protestas como una estrategia de confrontación, tendrían la opción de la mesa de cooperación, y las empresas sabrían que ignorar los reclamos ya no sería una estrategia viable sin consecuencias, abordando así los resultados de la falta de diálogo.

En el plano más operativo de la regulación, se pueden introducir mecanismos flexibles pero cooperativos, como “Acuerdos de Producción Limpia” sectoriales (ya existen APL en otros rubros, incluso en el sector forestal), donde las empresas forestales se comprometen a metas voluntarias de desempeño ambiental a cambio de reconocimiento público y agilidad en los permisos. Esto es un contrato *ganar-ganar*: las empresas tienen un incentivo reputacional y la comunidad/Estado obtiene más de lo requerido por ley, impactando positivamente en los resultados ambientales.

Estrategias para Mitigar la Presión Ecologista Radical sin Afectar la Sostenibilidad del Sector

Basado en la teoría de juegos, para restarle poder a los jugadores radicales se deben reducir sus recompensas e incrementar sus costos, a la vez que se *absorbe su base de apoyo* mediante la cooperación con los moderados, modificando así los resultados de su accionar:

- Aislamiento de violentistas: Intensificar la inteligencia policial para identificar células radicales y aplicar la ley con firmeza, por ejemplo, usar la Ley de Seguridad del Estado o Antiterrorista en casos calificados. Esto aumenta el costo de la estrategia violenta (alto riesgo de cárcel), reduciendo su atractivo. Sin embargo, debe hacerse con respeto para no alimentar su narrativa de victimización. Al mismo tiempo, ofrecer vías de salida a quienes abandonen la violencia: algún programa de reinserción laboral o apoyo si entregan armas y renuncian a la clandestinidad. Teóricamente, se ofrece a los jugadores radicales una estrategia alternativa con recompensas aceptables: dejar el juego violento y reingresar al juego político-social.
- Comunicación y transparencia ambiental: Muchas acciones radicales se justifican en la desconfianza hacia las empresas. Abrir completamente la información sobre impactos, realizar un monitoreo ambiental independiente (quizás con los mismos sellos ambientales) y permitir mejorar la visualización de las auditorías a las operaciones forestales quitaría argumentos a la propaganda radical de que “las forestales ocultan daños”. Si los hechos muestran, por ejemplo, que las empresas están restaurando bosques nativos (como en realidad lo están haciendo) y

compartiendo beneficios, los radicales pierden narrativa. Esto debe unirse a una renovada campaña nacional de comunicación y educación ambiental de “*Bosques para Chile 2.0*”, donde debe existir una unión público-privada entre los sectores involucrados.

- **Cooptación de demandas legítimas:** Varias causas que enarbolan los ambientalistas moderados podrían ser genuinas a nivel local, como la protección del agua y del bosque nativo. El Estado y las empresas deben hacer suyas esas banderas: por ejemplo, lanzar un *Programa masivo de rehabilitación ecológica con base genética de bosques nativos y huertos melíferos en áreas críticas*, y lanzar un *Programa educacional sobre el uso de los Productos Forestales No Madereros* (PFNM). Ya existe el Plan “*Siembra por Chile*” para la reforestación nativa; ampliarlo y tecnificarlo en convenio con comunidades y ONGs le quita a los radicales el monopolio de su falso amor a la biodiversidad y al bosque nativo, ya que están dispuestos a quemarlo o destruirlo.
- **Dividir y vencer:** En términos de juego, fracturar la coalición radical. Apoyar a los grupos étnicos no violentos otorgando tierras a las comunidades por vía institucional debilita a quienes predicán la vía armada. Si las comunidades ven resultados por la vía pacífica, es menos probable que apoyen o encubran a los violentos. Asimismo, involucrar a ONGs ambientales reconocidas, que participen en las soluciones (por ejemplo, a través de las certificadoras de Manejo Forestal Sustentable), hace que estos validen los avances y resten apoyo a las posturas intransigentes de los grupos menores radicales.
- **Propaganda del bien común:** Difundir los beneficios de la nueva estrategia cooperativa, lo que implica más empleo local, más áreas protegidas, captura de carbono y mejoramiento de la biodiversidad, para cambiar la percepción pública. Cuando la sociedad revalore el sector forestal sostenible, las acciones radicales serán condenadas incluso por la opinión pública progresista, restándoles legitimidad.

En resumen, se debe transformar el juego radical vs. sistema en un juego donde la mejor respuesta de los potenciales simpatizantes ya no sea unirse a la radicalización, sino cooperar en el nuevo modelo. Esto se logra combinando la represión focalizada o la disuasión con reformas auténticas para la incorporación de nuevos miembros o la cooptación, modificando los resultados de la interacción.

Programas de Educación Ambiental y Refuerzo de la Seguridad Jurídica

Estas son medidas de apoyo a largo plazo, pero que deben comenzar lo antes posible y que consolidan el equilibrio cooperativo, impactando en los resultados futuros del sector:

- **Educación ambiental en zonas forestales:** En el contexto de impulsar un cambio de actitud hacia el mundo de la madera por parte de la ciudadanía, la nueva campaña público-privada de propaganda forestal “*Bosque para Chile 2.0*” debe implementar programas educativos en escuelas rurales y comunidades sobre el manejo sustentable de bosques, el uso de la madera, los usos del papel, de la celulosa textil, los bonos de carbono, los bonos de la biodiversidad, el uso responsable de los PFNM, la prevención de incendios y el cuidado del agua. Si las nuevas generaciones entienden la importancia de ambos bosques – nativos y plantados –, serán actores informados que no verán a las plantaciones como ajenas, sino como un recurso manejable, útil y cercano. La educación ambiental comunitaria (talleres participativos, Días del Bosque locales) puede empoderar a la gente para colaborar en prácticas como la silvicultura preventiva, donde la limpieza de desechos vegetales que sirven de combustible debe eliminarse de las áreas de riesgo definidas por la comunidad empoderada. En términos de teoría de juegos, esto crea un conocimiento común que alinea las preferencias de los jugadores hacia la conservación activa en vez de la confrontación.
- **Capacitación en resolución de conflictos:** Extender la formación en negociación y mediación a líderes locales, sindicales y funcionarios. Así, cuando surjan disputas, estos actores tendrán

herramientas para buscar soluciones dialogadas y cambiarán su estrategia de “amenaza” a “colaborar y negociar”, sabiendo que eso puede traer mejores resultados.

- Seguridad jurídica multilateral: Por un lado, fortalecer la persecución penal de delitos (robos de madera, usurpaciones, incendios forestales) para que no queden impunes – la certeza del castigo es clave para disuadir esas estrategias dañinas. Por otro lado, dar seguridad jurídica a las comunidades indígenas no radicalizadas: acelerar la restitución de tierras calificada a través de CONADI o acuerdos con empresas, ya que algunas empresas forestales están dispuestas a vender tierras reivindicadas al Estado para solucionar temas específicos y locales. Si estas comunidades no radicalizadas tienen seguridad en la tenencia de tierras y ven respetados sus derechos, confiarán más en el Estado. Todo esto reduce la incertidumbre de los jugadores: las empresas saben a qué atenerse, donde las reglas son claras, simples y aplicadas uniformemente, y las comunidades también tendrán sus derechos protegidos.
- Reforma al sistema de seguros e inversiones post-conflicto: Dado el enorme costo de los incendios, se recomienda crear un seguro forestal público-privado que cubra a los pequeños propietarios en caso de incendios o daños por violencia. Esto funciona como una red de seguridad que mantiene a los jugadores pequeños en el juego cooperativo, ya que, de otro modo, tras un incendio y sin apoyo, pueden abandonar la actividad. También, un fondo de compensación para las víctimas de la violencia rural, tanto para las empresas como para las comunidades afectadas, ayudaría a sanar heridas y mostrar el compromiso del Estado.
- Innovación productiva: Incentivar y fomentar que el sector forestal diversifique sus productos hacia bienes de mayor valor agregado, madera para la construcción verde y bio productos, entre otros. Esto genera más empleo calificado y una mejor distribución de los beneficios, reduciendo los resentimientos. Un sector que provee materiales sustentables para la vivienda, con alto empleo, es visto como muy beneficioso. Aquí la recomendación es implementar la *Estrategia de Construcción en Madera*, ya propuesta por CORMA, para lograr que el 35% de las viviendas tengan una estructura de madera para el año 2050. El Gobierno Regional de Los Ríos ha adoptado esta estrategia y, junto con el sector privado y público, ha implementado la mesa de la madera con ese espíritu. Así, el bosque se conecta con soluciones habitacionales para la población, generando una narrativa positiva.

Cooperación Internacional y Certificación

Aprovechar la presencia de organismos como FSC, PEFC y los acuerdos climáticos internacionales para influir en los resultados del conflicto:

- Seguir elevando los estándares: Meta de que el 100% de la superficie plantada comercial esté certificada (hoy está en torno al 70%). Esto obliga a todas las empresas a cumplir con la participación social y el cuidado ambiental, homogeneizando el comportamiento cooperativo sectorial.
- Buscar el apoyo de programas nacionales como el “Santiago Climate Exchange” o internacionales, como REDD+ de carbono y los fondos climáticos, que paguen por conservar el bosque nativo y reforestar las zonas degradadas. Chile podría recibir financiamiento por capturar CO₂ con sus plantaciones y por restaurar ecosistemas. Este flujo puede invertirse localmente, generando incentivos económicos adicionales para las comunidades y las empresas que cooperen en proyectos de conservación, lo que implica incorporar a la *matriz de recompensas* que conservar también genera ingresos, no solo realizar plantaciones industriales.

En síntesis, las recomendaciones buscan realinear el juego: transformar las interacciones de modo que la cooperación, el cumplimiento de la ley, el diálogo y la evitación de la violencia sean la estrategia racional para cada actor. Esto implica modificar las recompensas (incentivos) – más beneficios por cooperar, más costos por no cooperar – y proporcionar canales de comunicación para coordinar las jugadas, tales como



mesas de diálogo y programas conjuntos. Además, repetir las interacciones en ambientes controlados, como proyectos piloto y períodos de prueba, ayudará a que los jugadores actualicen sus creencias: si las comunidades ven a una empresa cumplir su palabra repetidamente, eventualmente confiarán; si las empresas ven una reducción de la violencia tras atender las demandas, creerán en colaborar más, entre otros.

Finalmente, adoptar una visión de juego de suma positiva, reconociendo que un sector forestal sostenible puede continuar generando ganancias económicas y mejoras ambientales. Chile podría reforestar otro millón de hectáreas con plantaciones de crecimiento rápido que son capaces de fijar carbono con gran eficiencia, capturando una tonelada de CO₂ a un costo ocho veces menor que otros tipos de bosque sobre suelos erosionados para el año 2049. Por cada tonelada de madera producida, las especies de crecimiento rápido utilizan entre un 20% y un 30% menos de agua que los bosques más lentos, aprovechando eficientemente las aguas lluvias sin requerir riego artificial y generando beneficios sociales simultáneamente. De hecho, en el plan climático de Chile (Contribución Determinada a Nivel Nacional = NDC) se consideró establecer 200 mil ha de nuevas plantaciones en 10 años, con un potencial de absorción adicional de 3 millones de toneladas de CO₂ por año. Las políticas propuestas de recuperar 100 mil ha quemadas, un nuevo impulso de forestación sustentable y el manejo de bosques nativos, entre otros, ilustran cómo se puede crecer sin repetir errores. Cuando todos los actores asuman que “*ganar juntos*” es posible, se habrá cambiado la lógica del conflicto, enfocándolo en la construcción de resultados positivos para todos.

Todos los análisis respaldan la idea central de que el conflicto forestal chileno puede resolverse mediante un cambio de incentivos y estrategias hacia la cooperación, beneficiando tanto a la economía como al medio ambiente y a la sociedad. La teoría de juegos proporciona el lenguaje para comprender los comportamientos estratégicos y ayuda a comunicar estos conceptos de forma accesible a todos los actores, facilitando la implementación de soluciones que aborden los resultados del conflicto de manera integral y sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco sinceramente a la Dra. Alicia Ortega, al Sr. Braulio Gutiérrez y al Sr. Julio Torres por sus sugerencias y aportes, que han enriquecido significativamente este texto. Un reconocimiento muy especial al Dr. Eduardo Morales por sus comentarios y acertadas correcciones, cuya contribución ha sido esencial para la calidad del documento.

REFERENCIAS

Sin referencias.





APUNTE

Criterios prácticos para la recolección y almacenamiento de semillas forestales en programas de conservación, restauración y mejoramiento genético

Braulio Gutiérrez Caro¹ ¹ Instituto Forestal, sede Biobío. Concepción, Chile. bgutierr@infor.clDOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2025.637>

Recibido: 22.05.2025; Aceptado 06.06.2025.

RESUMEN

El documento entrega lineamientos técnicos para la recolección y almacenamiento de semillas forestales, fundamentales para iniciativas de restauración, conservación y mejoramiento genético. Destaca la necesidad de considerar aspectos genéticos, ecológicos y sanitarios para garantizar la viabilidad y utilidad del germoplasma recolectado.

Se subraya que la finalidad del uso de las semillas define criterios específicos: la restauración exige diversidad genética local, la conservación busca capturar la máxima variabilidad, y el mejoramiento selecciona individuos superiores. En todos los casos, es clave recolectar semillas maduras, sanas, de origen conocido y con alta viabilidad.

Respecto al almacenamiento, se diferencia entre semillas ortodoxas, que toleran la desecación y pueden almacenarse por años bajo condiciones controladas (baja humedad y temperatura), y recalcitrantes, que no pueden conservarse y deben ser usadas en la misma temporada de recolección.

Palabras clave: Semillas, recolección, almacenamiento,

SUMMARY

The document provides technical guidelines for the collection and storage of forest seeds, which are essential for restoration, conservation, and genetic improvement initiatives. It highlights the need to consider genetic, ecological, and sanitary aspects to ensure the viability and usefulness of the collected germplasm.

It emphasizes that the intended use of the seeds determines specific criteria: restoration requires local genetic diversity, conservation aims to capture maximum genetic variability, and genetic improvement focuses on selecting superior individuals. In all cases, it is crucial to collect mature, healthy seeds of known origin with high viability.

Regarding storage, a distinction is made between orthodox seeds—which tolerate desiccation and can be stored for years under controlled conditions (low humidity and temperature)—and recalcitrant seeds, which cannot be preserved and must be used within the same season.

Key words: Seeds collection, seeds storage, seeds



INTRODUCCIÓN

Las semillas forestales destinadas a restauración, conservación y mejoramiento genético deben cumplir con una serie de características técnicas, biológicas y genéticas que garanticen su eficacia en cada uno de estos propósitos. Algunas de estas características son comunes a los tres fines y otras son específicas para cada uno de ellos.

Las consideraciones genéticas en la colecta de semillas constituyen un aspecto prioritario, que resulta determinante para condicionar el éxito de las iniciativas de restauración, conservación o mejoramiento en que tales semillas serán utilizadas. Así, atributos relacionados con su origen, adaptación, diversidad genética, potencial evolutivo, diferencial de selección y otras, normalmente jugarán roles relevantes cuando las plantas derivadas de esas semillas sean establecidas en terreno, situación que ha sido descrita y detallada en abundante bibliografía (Bozano *et al.*, 2014; Thomas *et al.*, 2014, 2015; Gutiérrez, 2015; 2021; 2024; Ipinza & Gutiérrez, 2014). Consideraciones de carácter ecológico también son de importancia para guiar la colecta de semillas, velando por la mantención de las poblaciones donde se colecta, evitando alterar su dinámica y regeneración natural y evitando también comprometer la situación de otros organismos que hacen uso de las semillas con distintos fines ecológicos (León Lobos *et al.*, 2014; Bacchetta *et al.*, 2008).

Además de las consideraciones genéticas y ecológicas, existen otras consideraciones generales básicas que deben tenerse en cuenta para la adecuada recolección de semillas, las principales son: (i) la selección de la fuente semillera; (ii) el grado de madurez, aspecto fundamental que determina la oportunidad de la recolección y la utilidad de las semillas recolectada; (iii) la idoneidad biológica de la semilla, tópico que se relaciona con su estado sanitario como indicador de viabilidad; y (iv) tolerancia a la desecación, que determina la naturaleza ortodoxa o recalcitrante de las semillas y condiciona la posibilidad de almacenamiento de las mismas.

Independiente de los procedimientos operacionales para recolectar semillas, las consideraciones anteriores deben ser siempre tenidas en cuenta, pues son transversales a cualquier práctica de recolección de simientes. De hecho, ellas son la clave para obtener un germoplasma de utilidad, acorde a los fines perseguidos. En este contexto, el presente documento pretende destacar y difundir la importancia de las consideraciones básicas involucradas en la colecta de semillas y diferenciar las implicancias de aspectos relevantes de la recolección, especialmente en contextos de restauración, conservación y mejoramiento genético forestal.

CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA COLECTA DE SEMILLAS

Objetivo de la Colecta

Uno de los aspectos principales que guía la colecta de semillas es el objetivo, uso o destino que motiva la recolección de las mismas. La finalidad de uso determina aspectos técnicos relevantes de la recolección, particularmente de aquellos relacionados con el origen y la variabilidad genética que deben cumplir los lotes de semilla a colectar. En el **Cuadro 1** se diferencian esas características dependiendo de si las semillas se recolectarán para iniciativas de restauración, conservación o mejoramiento genético.

Independiente de los procedimientos operacionales para recolectar semillas, y de los objetivos de uso de las mismas, existen consideraciones generales que deben ser siempre tenidas en cuenta, pues son transversales a cualquier práctica de recolección u objetivo de uso. De hecho, ellas son la clave para obtener un germoplasma de utilidad, para cualquiera que sea el fin que se persigue. Entre tales aspectos se destacan los siguientes:

- *Viabilidad y germinación elevada:* Las semillas deben presentar altas tasas de germinación y buena viabilidad, lo que se relaciona con su madurez fisiológica, sanidad y almacenamiento adecuado.



- *Sanidad*: Libre de patógenos, plagas o daños físicos. Se deben cumplir estándares fitosanitarios para evitar la introducción o diseminación de enfermedades.
- *Identidad genética*: Las semillas deben corresponder fielmente a la especie y/o procedencia declarada. Esto es fundamental para evitar errores en restauración y programas de mejoramiento.
- *Pureza física*: El lote debe tener un alto porcentaje de semillas verdaderas y estar libre de material vegetal no deseado u otras impurezas.
- *Origen conocido y documentado*: Información sobre procedencia geográfica, altitud, tipo de ecosistema, y si provienen de poblaciones naturales, ensayos genéticos, huertos semilleros o rodales semilleros.

Cuadro1. Diferenciación de atributos relevantes de las semillas en función de su uso.

Características	Finalidad de uso		
	Restauración Ecológica	Conservación Genética	Mejoramiento Genético
Objetivo	Recuperar funciones ecológicas, biodiversidad y resiliencia de ecosistemas degradados	Preservar <i>ex situ</i> la diversidad genética de especies y poblaciones	Actividades orientadas a la producción comercial, de individuos superiores en atributos específicos de interés del productor.
Procedencia	Local o ecológicamente equivalente	Diversa y representativa de toda la variabilidad	Árboles seleccionados o progenitores superiores
Diversidad genética	Alta, para favorecer adaptación y resiliencia	Máxima, incluyendo variantes raras y adaptativas	Controlada, pero suficientemente diversa para evitar consanguinidad
Adaptabilidad	Alta adaptabilidad al sitio de plantación	Relevante para preservar variación adaptativa	Adaptabilidad combinada con rendimiento de rasgos deseados
Calidad genética	Representativa del ecosistema	Representativa y con información genética detallada	Superior en rasgos específicos (crecimiento, forma, etc.)
Muestreo genético	De al menos 30-50 árboles por población	Amplio y sistemático, incluyendo muchas poblaciones e individuos	Limitado a árboles élite con evaluación comprobada

Fuente Semillera

La idoneidad de las semillas para un fin particular está fuertemente relacionada con la fuente o población desde donde ellas se recolecten, situación que define los aspectos genéticos del germoplasma que se obtenga. Aspectos claves como la procedencia, la relación entre el sector de plantación y de abastecimiento de germoplasma, la variabilidad del área a recolectar, el número de árboles considerados en la recolección, la existencia de semilla local, etcétera son todas consideraciones fundamentales que quedan determinadas por la selección de la fuente semillera.

Para efectos de restauración, lo normal es pretender cosechar semillas del rodal más cercano al área donde se quiere plantar, lo que asegura trabajar con material ya adaptado a las características ambientales de la zona. Sin embargo, no se debe perder de vista que los rodales locales pueden no ser adecuados por distintos motivos (dañados, pocos árboles en etapa reproductiva, consanguinidad, etc.), y que para efectos

de variabilidad y conservación de potencial evolutivo es recomendado combinar la semilla de fuentes locales con proporciones menores de otras provenientes de fuentes más distantes, en la misma y en distintas zonas de procedencia (McKay *et al.*, 2005; Jones y Monaco, 2007; Mijnsbrugge *et al.*, 2010; Lowe *et al.*, 2010; Erikson & Halford, 2020; Gutiérrez, 2024).

En general, la observancia de las consideraciones genéticas puede materializarse, en la práctica, mediante la adecuada identificación o selección de las fuentes semilleras y sus procedencias, desde donde se recolectarán las semillas.

Madurez de los Frutos

Obtener frutos/semillas maduras es un aspecto crucial que define el momento en que se debe realizar la recolección, y que determina la viabilidad y calidad del material recolectado. La importancia de recolectar simientes maduras radica en que durante su maduración ellas adquieren la capacidad de germinar (germinabilidad), es decir que los embriones ya desarrollados puedan activarse y dar origen a una planta. También al madurar, las semillas ortodoxas adquieren tolerancia a la desecación, lo que permite que conserven su viabilidad durante el almacenamiento (León-Lobos *et al.*, 2014). La simiente inmadura, si bien puede evidenciar cierta capacidad de germinación, no posee tolerancia a la desecación, la que se adquiere al final de la fase de maduración. Cuando la semilla está madura es el momento óptimo para recolectarlas, ya que posteriormente su calidad comienza a decaer (León-Lobos *et al.*, 2014; Gold *et al.*, 2004; Di Sacco *et al.*, 2018).

Consecuentemente, la recolección debe efectuarse durante el periodo de dispersión de semillas, para asegurarse de obtener germoplasma fisiológicamente maduro. En algunas especies de semillas pequeñas o muy livianas que se dispersan por viento, como ocurre por ejemplo con ulmo, laurel y otras, es recomendable identificar los frutos maduros y recolectarlos antes de que se abran y liberen las simientes.

Un criterio que ayuda a definir el momento de cosecha y diferenciar las semillas/frutos maduros es la coloración. Al madurar, los frutos se tornan más oscuros y abandonan las tonalidades verdosas de sus etapas iniciales. La consistencia también es un indicador de madurez, en general el material de propagación inmaduro es más denso (duro) y se van ablandando a medida que madura. En las semillas la consistencia de los tejidos de reserva es más blanda cuando está inmadura y se hace más consistente al madurar (León-Lobos *et al.*, 2014).

Las características del pedúnculo también sirven como indicador de madurez, cuando los frutos están maduros y se acerca la dispersión, los pedúnculos comienzan a secarse y se vuelven frágiles, para permitir que los frutos se desprendan con facilidad. En aquellas especies que no liberan sus frutos, sino que los abren para liberar las semillas, el comienzo de la dehiscencia es el mejor indicador de madurez.

Se puede utilizar la información biológica disponible para estimar cuándo se producirá la dispersión de las semillas, aunque por lo general se dispondrá sólo de referencias bibliográficas o empíricas a un periodo de fructificación.

El momento oportuno para recolectar semillas de cada especie ha sido documentado por diversos autores, pero no se debe olvidar que ese dato constituye sólo una orientación general basada en observaciones puntuales de algunos años en particular. El criterio de fondo y primordial es que se debe recolectar semilla madura, y la maduración como cualquier estado fenológico varía entre temporadas debido a su condicionamiento genético e influencias ambientales. Así, es común que se observen diferencias en el momento de maduración de frutos de una misma especie entre años. Estas diferencias se asocian principalmente a diferencias de precipitación y temperatura. Por otra parte, atendiendo al clima y fisiografía del país, en Chile las semillas de una misma especie tienden a madurar primero en el norte que en el sur y en el valle antes que en la costa y la cordillera. Esta diferencia puede observarse además dentro de una misma población, en algunos casos atribuida a diferencias microclimáticas, pero principalmente a la

diversidad genética de los individuos, generando heterogeneidad en la maduración (León-Lobos *et al.*, 2014; Gold *et al.*, 2004)).

Sanidad de las Semillas

Un aspecto elemental es recolectar semillas sanas, sin indicios evidentes de daño que comprometan su viabilidad y capacidad para germinar y generar un individuo nuevo competente (Di Sacco *et al.*, 2018; Niculcar, 2021; Hall *et al.*, 2021). Por lo mismo, especial atención debe ponerse al estado sanitario, de modo de coleccionar semillas viables y descartar aquellas que no serán de utilidad en los procesos posteriores de viverización. En este sentido, reconocer semillas viables de cada especie es un requisito durante la recolección, el cual puede satisfacerse en base a la experiencia de los recolectores o con el uso de criterios orientadores como los siguientes:

Las semillas aparentemente viables lucen llenas, con su interior firme y de color blanquecino, mientras que las infestadas, dañadas o vanas, lucirán huecas, consumidas, partidas, resacas u oscuras en su interior. Semillas afectadas por insectos resultan evidentes y se pueden diferenciar por la presencia de perforaciones ocasionadas por estos agentes, sin embargo, el daño no siempre es observable a simple vista y se requiere partir las semillas para detectarlo.

La proporción de semillas vacías, abortadas, mal formadas o infestadas variará según la especie, la población y el año. Algunas especies, como las del género *Nothofagus*, tienden a mostrar años de buena semillación, seguido por varios años de escasa producción y alta proporción de semillas vacías. Por estas razones es esencial que el recolector evalúe la calidad física de las semillas a través de una "prueba de corte" antes de realizar la recolección. Esto le dará una idea de la cantidad de frutos o semillas a recolectar. La prueba de corte consiste en partir 10 a 20 unidades con una herramienta *ad hoc*, para comparar el número de semillas llenas con el de las vacías, abortadas o infestadas. Una lupa de campo (10x o 20x) ayudará a esta inspección. La prueba de corte se deberá realizar a frutos de varias plantas tomados al azar, de modo que la muestra sea representativa. Al mismo tiempo, permitirá estimar el aspecto general de frutos abortados o infestados, que deberán ser evitados durante la recolección.

El resultado de la prueba de corte provee de un cálculo aproximado del número de semillas sanas disponibles. Si la proporción de semillas vacías e infestadas es alta (ej. Mayor a 30%), se deberá recolectar un número mayor para compensar la pérdida por esta vía. La prueba de corte permitirá además decidir si vale la pena o no realizar la recolección, ya que, si la proporción de semillas llenas es baja, tal vez sea necesario buscar otra población para recolectar. Esta decisión dependerá del esfuerzo y tiempo requerido para recolectar la cantidad de semillas deseada, así como la importancia de la especie.

La prueba de corte también entrega información acerca de la madurez, y permite estimar la oferta de semillas, así como el rendimiento de la recolección. En efecto, al cortar los frutos, se tendrá una idea del número de semillas que contiene cada uno, con esto y considerando el número de frutos por planta, se podrá estimar la oferta de semillas de la población. Esta información es útil para estimar la cantidad de frutos que se debe coleccionar para cumplir con la cantidad requerida de semillas, observando siempre las consideraciones ecológicas y genéticas que en este documento se detallan.

Aspectos Prácticos

La cantidad de semillas a recolectar debe ser suficiente para cumplir con los objetivos de siembra, y también para efectuar los análisis de caracterización del lote coleccionado. Particularmente, las pruebas de germinación pueden consumir bastantes simientes, sobre todo cuando existe poca información previa, es de difícil germinación, o no ha sido cultivada previamente. Muchas veces es necesario probar diversos tratamientos pregerminativos antes de encontrar las condiciones adecuadas para la germinación.

Antes de iniciar la campaña de recolección de semillas es necesario planificar salidas de prospección, cuyo objetivo es ubicar las poblaciones de las especies que serán recolectadas, para poder volver a ellas cuando las semillas estén en condición de ser cosechadas. Se aconseja que estas salidas se efectúen durante la primavera, dado que es más probable encontrar flores o estructuras reproductivas que faciliten la

identificación y permitan estimar o predecir el nivel de semillación de esa temporada; normalmente la recolección propiamente tal se realizará en forma posterior, en verano hasta principios de otoño, durante el periodo de dispersión, cuando la semilla se encuentre madura. Las visitas de prospección son también la instancia apropiada para estimar cómo se presentará la temporada de semillación en especies que exhiben un marcado añerismo, y permiten definir si se justifica la recolección en función de la disponibilidad de semillas viables.

Para las visitas de prospección y de colecta, el conocimiento y la experiencia de expertos nacionales o locales residentes en las áreas de exploración y recolección pueden resultar muy útiles, especialmente para la localización, el reconocimiento y la fenología de las especies.

De acuerdo al estado fenológico en el que se encuentren las distintas especies, antecedentes bibliográficos y la experiencia de recolecciones anteriores, se puede estimar la fecha probable de recolección de modo de obtener material maduro justo antes de su dispersión natural. Después de seleccionar la población donde se recolectará la semilla, Bacchetta *et al.* (2008) sugieren examinar una primera muestra mediante una prueba de corte, por cuanto este simple análisis preliminar permite realizar una estimación aproximada de la calidad del material.

ALMACENAMIENTO DE SEMILLAS

Objetivo del Almacenamiento

Según los objetivos que se persigan, el almacenamiento de semillas requiere enfoques técnicos diferenciados. Para efectos de conservación se requiere un almacenamiento de largo plazo, que permita preservar la viabilidad de las semillas durante décadas o incluso siglos, garantizando la conservación genética y patrimonial de la diversidad biológica bajo condiciones altamente controladas. Este tipo de almacenamiento se efectúa con protocolos que involucran un estricto control del contenido de humedad de las semillas (3–7%), el uso de temperaturas muy bajas (hasta $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ o inferiores), complejas tecnologías (liofilización, criopreservación) e infraestructura especializada y protegida.

Por su parte, para objetivos de restauración o mejoramiento genético la idea es mantener semillas viables para ser utilizadas en un horizonte operativo definido. Basta con un almacenamiento de corto a mediano plazo, desde algunos meses hasta unos pocos años, con un enfoque funcional más inmediato y condiciones de preservación menos exigentes. En efecto, se pueden admitir mayor variabilidad en el contenido de humedad de las semillas y temperaturas de almacenamiento de hasta $3\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$, que son considerablemente menos bajas que las requeridas para el almacenamiento de largo plazo utilizado con fines de conservación.

A pesar de la utilidad que representa el almacenamiento de semillas, la posibilidad de implementarlo y el periodo por el cual puede ser usado está condicionado por la capacidad de las semillas para tolerar la desecación y mantener la viabilidad, situación que permite clasificarlas en semillas ortodoxas o recalcitrantes. Este aspecto y otros relativos al almacenamiento de semillas se discuten en los puntos siguientes.

Naturaleza de la Semilla (Ortodoxas, Recalcitrantes)

El almacenamiento de semillas sólo resulta apropiado para aquellas especies cuyas semillas toleran la desecación (semillas ortodoxas), y no resulta de utilidad en el caso de aquellas especies de semilla recalcitrante, que no toleran una deshidratación significativa respecto al contenido de humedad presente en el momento de la diseminación (generalmente entre el 30% y 50%), por lo mismo no pueden ser objeto de almacenamiento para las temporadas siguientes. En este contexto, a pesar de las décadas de investigación sobre métodos de almacenamiento, sólo se han hecho progresos limitados, de modo que en la práctica las semillas recalcitrantes no pueden almacenarse y deben usarse en la misma temporada de recolección (Gutiérrez, 2015).

Según León Lobos *et al.* (2014) cerca del 80% del total de la flora mundial posee semillas ortodoxas. En el caso de los árboles chilenos, las especies con semillas ortodoxas se caracterizan por poseer frutos secos, como las nueces producidas por los *Nothofagus* o las vainas indehiscentes como las de *Prosopis*, tara (*Caesalpinia spinosa*) o alcaparras (*Senna spp.*). Las semillas ortodoxas también pueden provenir de conos, como Ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*), ciprés de las Guaitecas (*Pilgerodendrum uviferum*) o alerce (*Fitzroya cupressoides*). Frutos carnosos, como las drupas del boldo (*Peumus boldus*) o las bayas del canelo (*Drimys winteri*) también pueden producir semillas ortodoxas (**Cuadro 2**).

Cuadro 2. Tipo de fruto y de semillas de los géneros de las especies forestales chilenas.

Género	Tipo de Semilla	Tipo de Fruto	Género	Tipo de Semilla	Tipo de Fruto
<i>Acacia</i>	(O)	(14)	<i>Legrandia</i>	(R)	(2)
<i>Aextoxicon</i>	(R)	(9)	<i>Lithraea</i>	(O)	(12)
<i>Amomyrtus</i>	(R)	(2)	<i>Lomatia</i>	(O)	(13)
<i>Araucaria</i>	(R)	(6)	<i>Luma</i>	(R)	(2)
<i>Aristotelia</i>	(O)	(2)	<i>Maytenus</i>	(O)	(4)
<i>Austrocedrus</i>	(O)	(6)	<i>Myrceugenia</i>	(R)	(2)
<i>Beilschmiedia</i>	(R)	(3)	<i>Nothofagus</i>	(O)	(15)
<i>Caldcluvia</i>	(O)	(4)	<i>Persea</i>	(R)	(3)
<i>Citronella</i>	(R)	(10)	<i>Peumus</i>	(O)	(9)
<i>Cordia</i>	(O)	(11)	<i>Pilgerodendron</i>	(O)	(6)
<i>Crinodendron</i>	(R)	(4)	<i>Pitavia</i>	(R)	(2)
<i>Cryptocarya</i>	(R)	(3)	<i>Podocarpus</i>	(O)	(7)
<i>Dasyphyllum</i>	(O)	(1)	<i>Pouteria</i>	(R)	(2)
<i>Drimys</i>	(O)	(2)	<i>Proustia</i>	(O)	(1)
<i>Embothrium</i>	(O)	(13)	<i>Prumnopitys</i>	(O)	(8)
<i>Escallonia</i>	(O)	(5)	<i>Quillaja</i>	(O)	(4)
<i>Eucryphia</i>	(O)	(4)	<i>Salix</i>	(O)	(4)
<i>Fitzroya</i>	(O)	(6)	<i>Saxegothea</i>	(O)	(6)
<i>Gevuina</i>	(R)	(15)	<i>Schinus</i>	(O)	(9)
<i>Gomortega</i>	(O)	(9)	<i>Sophora</i>	(O)	(14)
<i>Jubaea</i>	(O)	(9)	<i>Tepualia</i>	(O)	(4)
<i>Kageneckia</i>	(O)	(4)	<i>Trevoa</i>	(O)	(4)
<i>Laurelia</i>	(O)	(1)	<i>Weinmannia</i>	(O)	(4)
<i>Laureliopsis</i>	(O)	(1)			

(Fuente: Adaptado de León Lobos *et al.*, 2014)

Tipo de semilla: (O) Ortodoxa; (R) Recalcitrante.

Tipo de fruto: (1) Aquenio; (2) Baya; (3) Baya uniseminada; (4) Cápsula; (5) Cápsula pequeña; (6) Cono; (7) Cono con arilo carnoso; (8) Cono drupáceo; (9) Drupa; (10) Drupa carnosa; (11) Drupa leñosa; (12) Drupa seca; (13) Folículo dehiscente; (14) Legumbre indehiscente; (15) Nuez.

En los árboles nativos de semillas grandes, estas suelen ser recalcitrantes, como ocurre con la araucaria (*Araucaria araucana*), los bellotos (*Beilschmiedia miersii* y *B. berteriana*), el olivillo (*Aextoxicon punctatum*), lingue (*Persea lingue*) y peumo (*Cryptocarya alba*). Por el contrario, otras especies nativas de semilla grande son ortodoxas y resisten la desecación y el almacenamiento, por ejemplo, la palma chilena (*Jubaea chilensis*) y el chañar (*Geoffroea decorticans*).

También existen especies nativas con semillas recalcitrantes pequeñas, las que se caracterizan por presentar testas delgadas, membranosas, de superficie húmeda, un embrión proporcionalmente grande y generalmente de color verde. Algunos ejemplos de este tipo de semillas son las mirtáceas como el arrayán (*Luma apiculata*) y el chequén (*Luma chequen*).

Aunque las semillas recalcitrantes están distribuidas en distintos grupos y no siguen una regla general, para el caso de la flora chilena, existe una alta influencia taxonómica. Varios géneros y especies pertenecientes a las familias *Lauraceae* (peumo, lingue) y *Myrtaceae* (arrayán, chequén), han mostrado comportamientos de tipo recalcitrante en el almacenamiento. Mientras que otras familias de la flora chilena han demostrado tener sólo algunas especies de este tipo, como es el caso de *Proteaceae*, donde solo el avellano (*Gevuina avellana*) se muestra recalcitrante, mientras que las especies de los géneros restantes se comportan como ortodoxas, resistiendo sin problema la desecación y el almacenamiento (Radal (*Lomatia hirsuta*), fuinque (*L. ferruginea*), ciruelillo (*Embothrium coccineum*)).

Condiciones de Almacenamiento

La pérdida de viabilidad de las semillas es un fenómeno que está regido en gran parte por la tasa de respiración, lo que hace que las medidas que reduzcan dicha tasa, sin producir daños, permiten prolongar la vida de la semilla almacenada. Esta longevidad aumenta al disminuir la temperatura y concentración de oxígeno en la atmósfera de almacenamiento y el contenido de humedad de la semilla almacenada. Esta última es el parámetro clave que influye sobre el éxito del proceso (Bacchetta *et al.*, 2008), de aquí surge la necesidad de efectuar un apropiado secado antes de iniciar el almacenamiento.

Contenido de humedad de las semillas

Reduciendo el contenido de humedad, se reduce la respiración y con ello se desacelera el envejecimiento de la semilla y se prolonga su viabilidad, siendo un parámetro incluso más importante que el control de la temperatura durante el almacenamiento.

La disminución de la humedad de las semillas a almacenar se puede realizar mediante: (i) exposición al aire en ambientes secos, ventilados y sombríos; (ii) Deshidratación con desecantes artificiales como el gel de sílice, que permite conservación a mediano y largo plazo y alcanzar contenidos de humedad tan bajos como 1 a 3%; (iii) cámaras de deshidratación, que, mediante deshumidificadores y aire acondicionado, mantienen valores de humedad relativa entre 10 y 15%; (iv) ultradesecación, es una práctica poco difundida, debido a que involucra procedimientos complejos como la liofilización, la inmersión en gases secos o los filtros moleculares, sin embargo, a pesar de sus complejidades, involucra importantes ventajas, como la de no requerir temperaturas de conservación tan bajas como las usadas en el desecado tradicional, y conservar en mejor forma la viabilidad de las semillas.

Contenidos de humedad de 4-8% son adecuados para el almacenamiento efectivo de semillas ortodoxas (Bacchetta *et al.*, 2008; FAO, 1991; Gutiérrez y Koch, 2015).

En efecto, distintos antecedentes señalados por Bacchetta *et al.* (2008) indican que el contenido de humedad de las semillas, más que la temperatura de conservación de las mismas, determina en mejor forma el éxito de la conservación. Así, semillas ultradesecadas por liofilización y mantenidas a temperatura ambiente durante 10 años, han mostrado un mejor comportamiento que las conservadas a baja temperatura. De igual forma, semillas ultradesecadas con gel de sílice y mantenidas 40 años en un armario a temperatura ambiente, no han tenido un comportamiento distinto al de otras con mayor contenido de humedad, pero almacenadas en cámara fría. No obstante, parece evidente que la baja temperatura complementa, por lo que sería poco sensato prescindir de ella.

Atendiendo al efecto relevante del contenido de humedad en la conservación de semillas ortodoxas, los envases que se utilicen para este fin deben ser absolutamente herméticos, en el sentido de no permitir el paso de vapor de agua a su interior. Debe tenerse en cuenta que la humedad relativa en una cámara fría puede ser alta, y que las semillas secas son fuertemente higroscópicas, de modo que, si el envase no es suficientemente hermético, a la larga la humedad de la semilla tenderá a equilibrarse con la humedad ambiental exterior, perdiéndose así la posibilidad de conservar su viabilidad en el largo plazo.

Recipientes impermeables de cierre hermético, como latas, frascos de vidrio, de plástico o envases de papel aluminio laminado, son apropiados para guardar semillas ortodoxas que ya han alcanzado el contenido de humedad correcto para almacenamiento

En vez de controlar la humedad en los envases, es posible controlarla en la misma cámara de almacenamiento, convirtiendo las cámaras frías en cámaras secas. Así, al mantener una temperatura alrededor de 0°C se puede conseguir una humedad relativa de aproximadamente el 15%, de modo que esta solución resulta más eficaz que disponer de una cámara a -20°C donde se descuide la hermeticidad de los envases. Sin embargo, el control de la humedad dentro de los envases mismos con gel de sílice es a la larga más práctico, por cuanto permite alcanzar un mayor nivel de secado, permitiendo además un traslado rápido del material a otras cámaras, en caso de mudanza o problemas técnicos.

Control del Oxígeno

La forma más evidente de reducir la tasa de respiración aeróbica consiste en excluir el oxígeno de la atmósfera que rodea a las semillas. Esto puede efectuarse sustituyendo el oxígeno por otros gases, como CO₂ o nitrógeno, o mediante un vacío parcial o completo. Sin embargo, algunos de estos métodos son de costosa aplicación, y además sus efectos sobre la vida de la semilla no son tan notables como los que tienen las diferencias de temperatura y humedad (FAO, 1991). Lo anterior obedece a que la exclusión del oxígeno evita la respiración aeróbica, pero no la anaeróbica, mientras que reduciendo el contenido de humedad y la temperatura se consigue rebajar el nivel de ambas.

En la práctica para controlar el contenido de oxígeno se recomienda un método sencillo consistente simplemente en llenar lo más posible unos recipientes herméticos. Si dentro del recipiente queda solamente una pequeña cantidad de aire en comparación con el volumen ocupado por las semillas, se consumirá el oxígeno y se producirá CO₂. La combinación resultante, más CO₂ que O₂, es favorable para la longevidad de las semillas ortodoxas.

Temperatura de Almacenamiento

Cuanto más baja es la temperatura, tanto menor es la tasa de respiración, y por ello tanto más extensa será la vida de la semilla almacenada. En el caso de las semillas ortodoxas, cuyo contenido de humedad puede reducirse hasta unos niveles bajos, se consigue una longevidad aún mayor mediante el almacenamiento a temperaturas inferiores a 0°C.

Cuanto más baja sea la temperatura que hay que mantener en una cámara fría, tanto más alto será su costo, y posiblemente no sean necesarias temperaturas inferiores a cero grados cuando la semilla, está adecuadamente seca (4-8% contenido de humedad) o cuando solo se requiere almacenarla por uno o dos años. La conveniencia de las temperaturas inferiores a cero grados se manifiesta preferentemente para períodos de almacenamiento de cinco años o más.

En general, temperaturas de 1 a 5°C son adecuadas para almacenamiento de hasta cinco años. Para casos especiales de conservación de largo plazo se pueden usar temperaturas de -4 a -15°C, no obstante, es necesario evitar por completo los riesgos de daño por congelación debido a la formación de hielo en las semillas que tienen un CH alto. Para usar temperaturas bajo 0°C el contenido de humedad no puede ser superior al 15%.

El uso de bajas temperaturas ha sido algo generalizado en la conservación de semillas a largo plazo. En efecto, actualmente los modernos bancos de semillas consideran la utilización de una cámara fría capaz de conseguir temperaturas de al menos -15° a -20°C. Sin embargo, temperaturas moderadamente bajas, entre 1 y 5°C, pueden ser más que suficientes para almacenar semilla seca por varias temporadas.

También debe tenerse en consideración que, si las semillas son expuestas a las bajas temperaturas sin secarse adecuadamente (menos de 20% de contenido de humedad), pueden formarse cristales de hielo en el interior de las células, lo que puede dañar los tejidos y matar a las semillas.



La priorización exclusiva de la temperatura podría comprometer llevar a descuidar el factor de baja humedad, sea por no deshidratar lo suficiente o por utilizar envases inadecuados, comprometiendo la eficacia del almacenamiento.

CONCLUSIONES

La colecta y almacenamiento de semillas forestales constituyen etapas críticas en los programas de restauración ecológica, conservación genética y mejoramiento forestal. Su adecuada implementación requiere la integración de criterios técnicos, genéticos y ecológicos que aseguren la calidad, viabilidad y funcionalidad del germoplasma recolectado.

La finalidad de uso de las semillas determina requerimientos específicos en términos de procedencia, diversidad genética y calidad del material. Así, las iniciativas de restauración demandan semillas con alta diversidad genética y adaptación local; la conservación genética requiere capturar la mayor variabilidad intraespecífica posible; y el mejoramiento forestal depende de la selección de individuos con atributos superiores y rendimiento comprobado.

Por su parte, la posibilidad de almacenamiento y la extensión del mismo depende de la naturaleza de las semillas. Las semillas ortodoxas pueden conservarse por períodos prolongados bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, mientras que las recalcitrantes presentan serias limitaciones para su almacenamiento debido a su baja tolerancia a la desecación. Las condiciones de almacenamiento pueden ser variables, dependiendo fundamentalmente del contenido de humedad de las semillas, y también de la temperatura de almacenamiento, la concentración de oxígeno y de la impermeabilidad y hermeticidad de los contenedores utilizados.

REFERENCIAS

- Bacchetta, G., Bueno-Sánchez, A., Fenu, G., Jiménez-Alfaro, B., Mattana, E., Piotto, B. & Virevaire, M. (Eds). (2008).** Conservación *ex situ* de plantas silvestres. Principado de Asturias / La Caixa. 378 p.
- Bozzano, M., Jalonen, R., Thomas, E., Boshier, D., Gallo, L., Cavers, S., Bordács, S. et al. (Eds). (2014).** Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. State of the World's Forest Genetic Resources –Thematic Study. Rome, FAO and Bioversity International. 281 p.
- Di Sacco, A; Way, M; León Lobos, P. y Suarez Ballesteros, C.I. (2018).** Manual de recolección, procesamiento y almacenamiento de semillas de plantas silvestres. V1.2. Royal Botanic Gardens Kew. Disponible en <http://brahmsonline.kew.org/msbp/Training/Resources>
- Erikson, V. & Halford, A. (2020).** Seed planning, sourcing and procurement. Restoration Ecology, 28(s3): s216-s224. <https://doi.org/10.1111/rec.13199>
- FAO. (1991).** Guía para la manipulación de semillas forestales. Estudio FAO Montes 20/2. Roma. 502 p.
- Gold, K., León-Lobos, P. & Way, M. (2004).** Manual de recolección de semillas de plantas silvestres para conservación a largo plazo y restauración ecológica. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro regional de Investigación Intihuasi. La Serena Chile. Boletín INIA N° 110. 62 p.
- Gutiérrez, B. (2024).** ¿Es la semilla de origen local el mejor material genético para efectos de restauración? Ciencia & Investigación Forestal, 29(3): 85–94. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2023.598>
- Gutiérrez, B. (2021).** Consideraciones genéticas para la obtención de semillas y viverización de plantas para restauración. En: Ipinza, R., Gutiérrez, B., Molina, M. & Barros, S. (Eds). Buenas prácticas y consideraciones genéticas para recuperación de bosques nativos degradados. ISBN N° 9787-956-318-204-0. Instituto Forestal-Fondo Investigación del Bosque Nativo. Cap 9. Pp: 221-237. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/31302>

- Gutiérrez, B. (2015).** Consideraciones para el muestreo y colecta de germoplasma en la conservación *ex situ* de recursos genéticos forestales. En: Gutiérrez, B., Ipinza, C. & Barros, S. (Eds). Conservación de recursos genéticos forestales: Principios y prácticas. Instituto Forestal. Capítulo 10. Pp: 179-196. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/20830>
- Gutiérrez, B. & Koch, L. (2015).** Conservación de germoplasma *ex situ*: protocolos y estrategias para la mantención de un banco *in vitro*. Ciencia & Investigación Forestal, 21(1): 69–82. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2015.433>
- Hall, RM., Urban, B., Skálová, H., Moravcová, L., Sölter, U., Starfinger, U., Kazinczi, G. et al. (2021).** Seed viability of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is affected by seed origin and age, but also by testing method and laboratory. NeoBiota 70: 193–221. <https://doi.org/10.3897/neobiota.70.66915>
- Ipinza, R. & Gutiérrez, B. (2014).** Consideraciones genéticas para la restauración ecológica. Ciencia & Investigación Forestal, 20(2): 51-72. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2014.421>
- Jones, T. & Monaco, T. A. (2007).** Restoration Practitioner's Guide to the Restoration Gene Pool Concept. Ecological Restoration, 25(1): 12-19. <https://doi.org/10.3368/er.25.1.12>
- León-Lobos, P., Sandoval, A., Bolados, G., Rosas, M., Stark, D. & Gold, K. (2014).** Manual de recolección y procesamiento de semillas de especies forestales. Boletín INIA N° 280. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Intihuasi, La Serena, Chile. 96 p.
- Lowe, AJ. (2010).** Composite provenancing of seed for restoration: progressing the 'local is best' paradigm for seed sourcing. The State of Australia's Birds 2009: restoring woodland habitats for birds. Compiled by David Paton and James O'Connor. Supplement to Wingspan 20(1) March.
- McKay, JK., Christian, CE., Harrison, S. & Rice, KJ. (2005).** How local is local? A review of practical and conceptual issues in the genetics of restoration. Restoration Ecology, N°13. Pp: 432–440. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00058.x>
- Mijnsbrugge, KV., Bischoff, A. & Smith, BM. (2010).** A question of origin: where and how to collect seed for ecological restoration. Basic and Applied Ecology, N° 11. Pp: 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2009.09.002>
- Niculcar, R. (2021).** Manual de colecta y conservación *ex situ* de semillas. Utilización en Restauración Ecológica en el Parque Nacional Torres del Paine. Primera Edición. Ministerio de Agricultura. Servicio Agrícola y Ganadero. Punta Arenas. 224 p.
- Thomas, E., Jalonen, R., Loo, J., Boshier, D., Gallo, L.; Cavers, S., Bordács, S. et al. (2014).** Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. Forest Ecology and Management, N° 333. Pp: 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.015>
- Thomas, E., Jalonen, R., Loo, J. & Bozzano, M. (2015).** Cómo evitar el fracaso en la restauración forestal: la importancia de disponer de un germoplasma genéticamente diverso y adaptado a los sitios de plantación. Unasylva 245, vol. 66 2015-3. Pp: 29-36.



www.infor.cl
<https://revista.infor.cl>