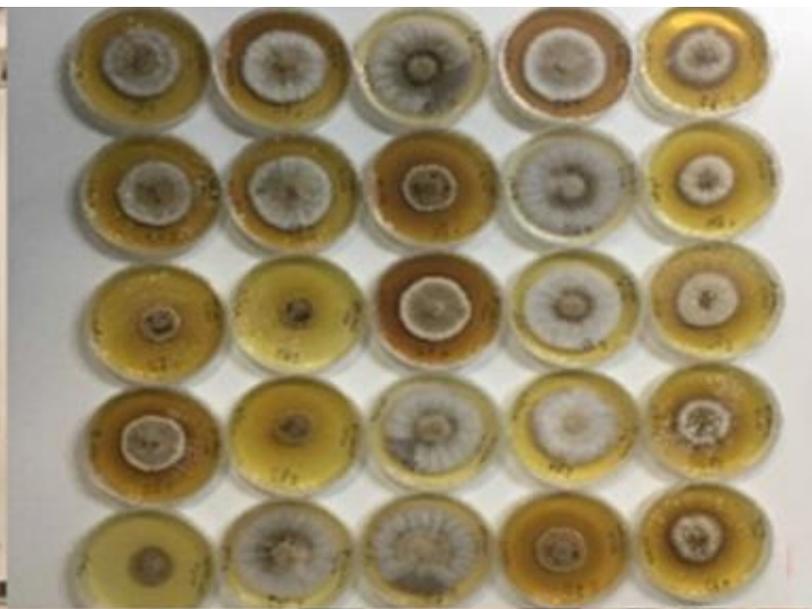




CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL



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 revista 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/index.php/infor>) 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 y Braulio Gutiérrez
Editores
sbarros@infor.cl y bgutierr@infor.cl



CONTENIDO

ARTÍCULOS

Análisis de Germinación de Semillas de *Eucalyptus nitens* Tratadas con Radiación Gamma: Indicios de Efecto Hormético. **Braulio Gutiérrez; Laura Koch; Daniel Villegas; Jorge González; Doris Ly; María Molina; Patricio Rojas & Ethel Velásquez. Chile.** 7

Influencia de medios de cultivo y niveles de pH en el crecimiento in vitro de 6 cepas de 3 especies del género *Suillus*. **Patricio Chung G. Chile.** 17

Importancia del sector forestal en la contabilidad de gases de efecto invernadero (GEI) del país. **Yasna Rojas; Carlos Büchner; Marjorie Martin; Sabine Müller-Using & Carlos Bahamondez. Chile.** 35

Propuesta para la definición de un diámetro meta para los árboles futuro en renovales de roble (*Nothofagus obliqua*). **Sabine Müller-Using; Yasna Rojas & Marjorie Martin. Chile.** 49

APUNTES

Antecedentes iniciales para la utilización de especies de *Salix* como biomasa para energía en la Región de Aysén. **Juan Carlos Pinilla; Francisca Riquelme & Bernardo Acuña. Chile.** 63

OPINIONES

Integridad y multifuncionalidad: un modelo conceptual para hacer efectiva la restauración de los bosques nativos a gran escala. **Christian Little; Bastienne Schlegel; Gerardo Vergara & Mauro E. González. Chile.** 77



ARTÍCULO

Análisis de Germinación de Semillas de *Eucalyptus nitens* Tratadas con Radiación Gamma: Indicios de Efecto Hormético.

Braulio Gutiérrez^{1*}; Laura Koch¹; Daniel Villegas²; Jorge Gonzalez¹; Doris Ly²; María Molina¹; Patricio Rojas³ & Ethel Velásquez².

¹ Instituto Forestal, sede Biobío. Concepción. bgtierr@infor.cl, lkoch@infor.cl, jgonzalez@infor.cl; mmolina@infor.cl

² Comisión Chilena de Energía Nuclear. Centro de Estudios Nucleares La Reina. Santiago. daniel.villegas@cchen.cl; doris.ly@cchen.cl; ethel.velasquez@cchen.cl

³ Instituto Forestal, sede Metropolitana. Santiago. parojas@infor.cl

* Autor de correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.554>

Recibido: 01.11.2021; Aceptado 17.12.2021

RESUMEN

Se analiza un ensayo de germinación en laboratorio para evaluar el efecto de cinco dosis de radiación gamma (10, 20, 30, 40 y 50 Gy) más un testigo sin irradiar, sobre los parámetros capacidad de germinación (CG), energía germinativa (EG) y periodo de energía (PE) de semillas de *Eucalyptus nitens*. Se concluye la existencia de un efecto significativo de radio-hórmesis asociado al tratamiento de 10 Gy, el cual aumenta la capacidad germinativa respecto al testigo sin irradiar. Ninguno de los tratamientos restantes resulta diferente al testigo en capacidad germinativa, energía germinativa ni periodo de energía.

Se comparan los resultados con los registrados en la bibliografía y se plantean recomendaciones para estudios posteriores en esta materia.

Palabras clave: *Eucalyptus nitens*, radiación gamma, hormesis, germinación.

SUMMARY

A laboratory germination test is analyzed to evaluate the effect of five doses of gamma radiation (10, 20, 30, 40 and 50 Gy) plus a control without irradiation, on the parameters of germination capacity (GC), germination energy (GE) and energy period (EP) of *Eucalyptus nitens* seeds. The existence of a significant effect of radio-hormesis associated with the 10 Gy treatment is concluded. This treatment increases the germination capacity in relation to the not irradiated control. None of the remaining treatments is different from the control in germination capacity, germination energy or energy period.

The results are compared with those recorded in the bibliography. Recommendations are made for further studies in this area.

Keywords: *Eucalyptus nitens*, gamma radiation, hormesis, germination

INTRODUCCIÓN

La inducción de mutaciones mediante radiación nuclear ha jugado un rol importante en el mejoramiento de diversas especies de cultivo agrícola (FAO/IAEA, 2020)¹, sin embargo no ha sido utilizada en forma exitosa en especies forestales. El prolongado ciclo reproductivo de estas últimas especies (Gustafsson & Mergen, 1964; Mukhtar *et al.*, 2013; Riyal, 2011), así como la gran diversidad genética que ellas presentan, constituyen importantes desventajas y limitaciones para realizar mejoramiento genético vía mutagénesis inducida, técnica que es especialmente efectiva en cultivos con una base genética angosta,

¹ A noviembre del año 2021 la base de datos de IAEA registra 3.365 variedades de cultivo obtenidas por mutagénesis inducida por radiación nuclear. Aproximadamente la mitad de ellas corresponde a cereales; un 40% se distribuye entre flores, legumbres, plantas alimenticias y de aceite comestible; el porcentaje restante son diversas y variadas categorías, ninguna de las cuales corresponde a árboles forestales. (<https://mvd.iaea.org>).

donde la diversidad alélica natural es limitada (Kumar, 2012; Jankowicz-Cieslak & Till, 2015), situación precisamente opuesta a la presente en especies forestales.

Otro uso de la radiación ionizante, pero que no busca inducir cambios permanentes en el material genético, es la radio-hórmesis u hormesis por radiación, consistente en la aplicación de pequeñas dosis de radiación gamma² para generar distintos efectos biopositivos o respuestas de activación metabólica en los organismos irradiados (Luckey, 1980 cit. por Luckey y Lawrence, 2006).

Los primeros estudios en radio-hórmesis datan de las décadas de 1950-60 y señalan diversos efectos estimulantes de bajas dosis de radiación ionizante sobre cultivos vegetales de importancia agrícola (cereales, papas y cultivos forrajeros), en los que se observó estimulación de las tasas de germinación, mejoras en crecimiento radical y mayor velocidad de crecimiento inicial (FAO/IAEA, 1966). Con posterioridad y tras múltiples evaluaciones, estos efectos han sido confirmados en distintos parámetros asociados a cambios fisiológicos como la germinación de semillas, la estimulación/inhibición del crecimiento vegetal y otros (Piri *et al.*, 2011; Calabrese, 2014). Sin embargo, el efecto de bajas dosis de radiación gamma sobre árboles forestales ha sido relativamente poco estudiado en los últimos 50 años.

Iglesias *et al.* (2012) abordan la importancia y el potencial del uso de bajas dosis de radiación gamma en estas especies, indicando que existen pocas referencias al uso de radio-hórmesis en árboles de importancia forestal. Aun así, existen antecedentes que indicarían diversas respuestas ante la estimulación con bajas dosis de radiación en especies forestales, entre ellas, Ferreira *et al.* (1980) describieron un efecto promotor de la germinación en semillas de *Araucaria angustifolia* tratadas con radiación gamma; González *et al.* (1999) indican estimulación en el crecimiento de raíz principal, número de hojas primaria y crecimiento del hipocotilo en plántulas de *Pinus monctezumae*; Iglesias *et al.* (2010) establecen que la aplicación de bajas dosis de radiación gamma en semillas de *Abies religiosa* produce un efecto positivo sobre altura de las plantas.

Con la finalidad de contribuir al conocimiento y dilucidar el grado de aplicación práctica que los efectos de la radio-hórmesis pudiesen tener en especies de interés forestal, en el presente artículo se presenta un trabajo preliminar con los primeros resultados obtenidos al analizar el efecto de bajas dosis de radiación gamma sobre los parámetros de germinación de semillas de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden.

MATERIAL Y MÉTODO

El estudio de dosimetría para determinar las dosis de radiación a considerar en el ensayo de germinación, así como la irradiación de las semillas consideradas en el mismo, fueron efectuadas en el laboratorio de irradiaciones de la Comisión Chilena de Energía Nuclear, en Santiago, por profesionales pertenecientes a esa dependencia. Posteriormente, la instalación y evaluación propiamente tal del ensayo de germinación con la semilla irradiada que se evalúa en este artículo, se realizó en laboratorios del Instituto Forestal en Concepción.

Determinación de las dosis de irradiación a ensayar

Los tratamientos de irradiación fueron realizados en Irradiador Gammacell 220R, el cual cuenta con una fuente de Co60 con una actividad de 800 Curie (Ci) y un volumen de irradiación cilíndrico de 2 litros. Previo a la realización de los tratamientos, se caracterizó el volumen de irradiación mediante dosimetría Fricke formulada de acuerdo a Norma ASTM E-1026 e instructivos internos de CCHEN, estableciéndose una tasa de dosis de 8.98 Gy/min. Una vez establecida esta tasa de dosis y en función de la vida media o decaimiento del Co60 fue posible establecer con precisión para cualquier fecha, el tiempo de exposición de las semillas en el irradiador, para obtener una determinada dosis de radiación absorbida que se desee ensayar. A partir de estos antecedentes se realizó una curva dosimétrica con dosis crecientes (0 a 200 Gy) para determinar dosis letal DL50, nivel de irradiación por sobre la cual se genera una mortalidad del 50% de las semillas irradiadas, verificado como la pérdida de germinación respecto a semillas sin irradiar. La información obtenida permitió establecer que la DL50 para semillas de *E. nitens* se alcanza al irradiar

² Radiación electromagnética ionizante, de altísima frecuencia, consistente en fotones emitidos por elementos radiactivos

con dosis de 160 Gy³. A partir de este dato y considerando que el 30% de la DL50 constituye un límite práctico habitual para probar efectos horméticos, se definió como dosis a ensayar valores que cubriesen el rango entre 0 y 50 Gy.

El estudio de dosimetría y el desarrollo del protocolo de irradiación constituyen por si solos actividades de investigación que ameritan ser detallados y publicados como documentos independientes. Ellos involucran detalles metodológicos de alta complejidad que escapan al alcance de este artículo.

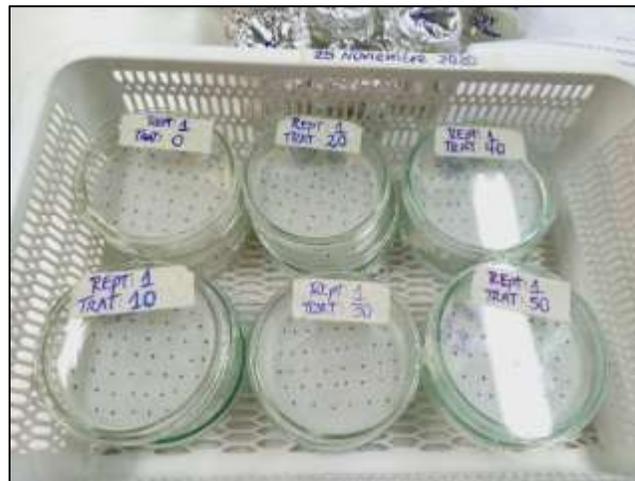
Para efectos de este estudio, la irradiación propiamente tal de las semillas que se utilizaron en el ensayo de germinación, se efectuó en ampollas de vidrio de 5 ml (proveedor FAVIMA: www.favima.cl). En cada ampolla se depositó 0,1 g de semillas, aproximadamente 125 unidades, y posteriormente fueron irradiadas por el tiempo necesario para obtener las cinco dosis a evaluar (10, 20, 30, 40 y 50 Gy). Para disponer las ampollas en el irradiador se utilizó una plataforma de plumavit, de modo que ellas quedasen en el punto central de plano dosimétrico medio (10 cm) del irradiador.

Montaje Ensayo de Germinación

El ensayo de germinación se estableció en laboratorio, siguiendo las directivas de ISTA⁴ (2016). En él se comparó semilla de *E. nitens* sometida a cinco dosis de radiación ionizante, más un control sin irradiar (Cuadro 1). Cada tratamiento fue representado con tres repeticiones de 50 semillas cada una, las que fueron dispuestas en placas Petri con papel filtro humedecido previamente esterilizado. Cada placa se identificó con el número del tratamiento y la repetición (Figura 1); posteriormente fueron incubadas en cámara germinadora, en oscuridad, a temperatura de 22°C durante 20 días. Previo al montaje del ensayo, las semillas se dejaron en remojo por un día en agua destilada a temperatura ambiente.

Cuadro 1. Tratamientos de irradiación evaluados.

Tratamientos	Dosis de radiación
T0	Testigo sin irradiar
T1	10 Gy
T2	20 Gy
T3	30 Gy
T4	40 Gy
T5	50 Gy



(Fotografía: L. Koch)

Figura N°1. Ensayo de germinación de semillas irradiadas de *E. nitens* dispuesto en placas Petri

³ Gray (Gy) es la unidad usada para representar la cantidad de energía radiante absorbida en cierta cantidad de tejido. Un Gray equivale a un Joule de energía absorbida por kilogramo de materia (J/Kg).

⁴ Asociación Internacional para el Análisis de Semillas

Evaluación del ensayo de germinación

El ensayo fue monitoreado hasta que se detuvo la germinación (20 días), registrándose diariamente, a la misma hora, el número de semillas germinadas en cada repetición de cada tratamiento, y retirándolas de las placas. Como criterio de germinación se asumió la presencia de radícula extendida en una longitud mayor a 2 mm (figura N° 2).

Con los datos de germinación diaria de las tres repeticiones de cada tratamiento, se construyó la curva de germinación acumulada diaria y a partir de ella se obtuvo los valores de los parámetros: Capacidad Germinativa (CG%); Energía Germinativa (EG%) y Periodo de Energía (PE) de acuerdo a la metodología tradicional del valor máximo de Czabator (1962). Al respecto conviene recordar, que la energía germinativa (EG) corresponde al porcentaje de germinación acumulado al momento en que la tasa de germinación alcanza su valor máximo. La cantidad de días requeridos para alcanzar este máximo es el parámetro denominado periodo de energía (PE); en tanto que la germinación final obtenida al final del ensayo es la capacidad germinativa (CG).



(Fotografía: L. Koch)

Figura 2. Semilla germinada de *E. nitens*

Para los tres parámetros mencionados se realizó análisis de varianza y pruebas de comparación múltiple de medias (Tuckey, $\alpha=0,05$) para determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, utilizando el software Infostat 2015. Para efectos del análisis e interpretación estadístico, las variables expresadas en porcentaje (CG y EG) fueron previamente transformados a unidades de Bliss usando la transformación angular o del arcoseno, que resulta especialmente apropiada para análisis de varianza de variables en porcentajes o proporciones (Sokal y Rohlf, 1980; Mead *et al.*, 2002). No obstante, para la presentación de resultados se conservan los valores en porcentaje.

RESULTADOS

Las curvas de germinación acumulada de los tratamientos ensayados (Figura 3) evidencian que todos ellos alcanzan valores similares, y que el testigo muestra un desempeño intermedio entre el de los tratamientos con bajas dosis de irradiación (10, y 20 Gy) y el de los tratamientos con altas dosis de irradiación (40 y 50 Gy). En general y como resulta habitual en semillas de *E. nitens*, esta presentó una alta germinación, tanto en el testigo como en todos los tratamientos de irradiación evaluados.

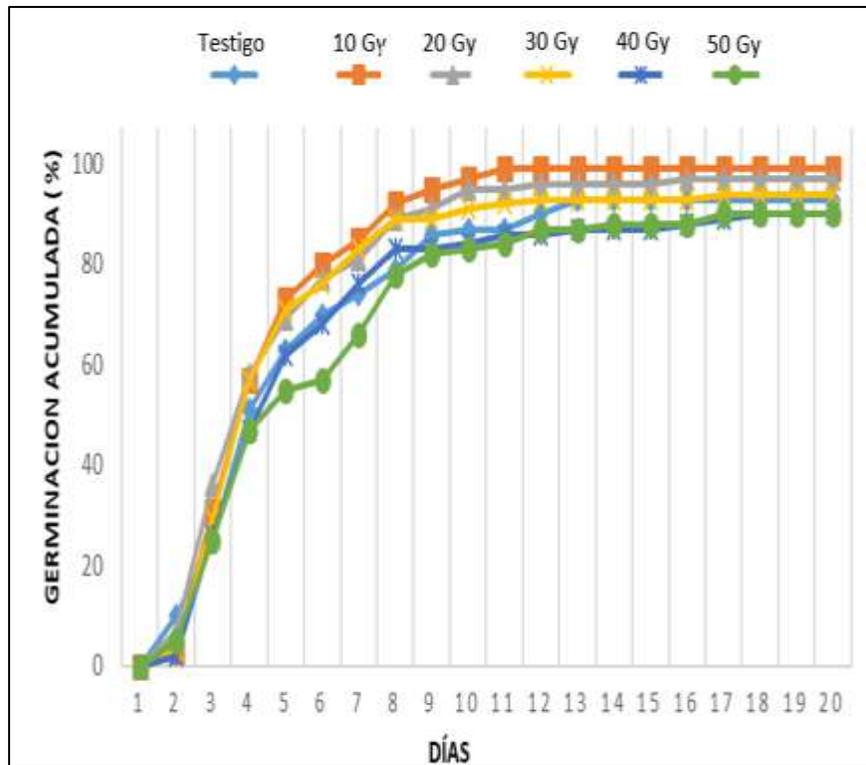


Figura N° 3. Germinación acumulada de semillas de *E. nitens* tratadas con distintas dosis de radiación gamma

La capacidad germinativa total, que fluctúa entre 90 y 99%, presenta diferencias significativas entre tratamientos ($p\text{-value}= 0,0035$), observándose una relación inversa entre dosis y capacidad de germinación (Figura 4-A). En este caso el testigo forma un grupo homogéneo con los tratamientos de 20, 30, 40 y 50 Gy, en tanto los tratamientos de 10 y 20 Gy constituyen un grupo distinto y de mayor germinación. Así, el tratamiento de menor dosis (10 Gy) resulta estadísticamente superior al testigo y a los tratamientos restantes, excepto al de 20 Gy que es la segunda menor dosis considerada en el ensayo. La máxima tasa de germinación o energía germinativa fluctúa entre 50 y 69% sin evidenciar diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y testigo (Figura 4-B), lo mismo ocurre con el periodo de energía, o tiempo requerido para lograr tal germinación, el que fluctúa entre 4,3 y 6 días (Figura 4-C) y tampoco exhibe diferenciación estadística significativa.

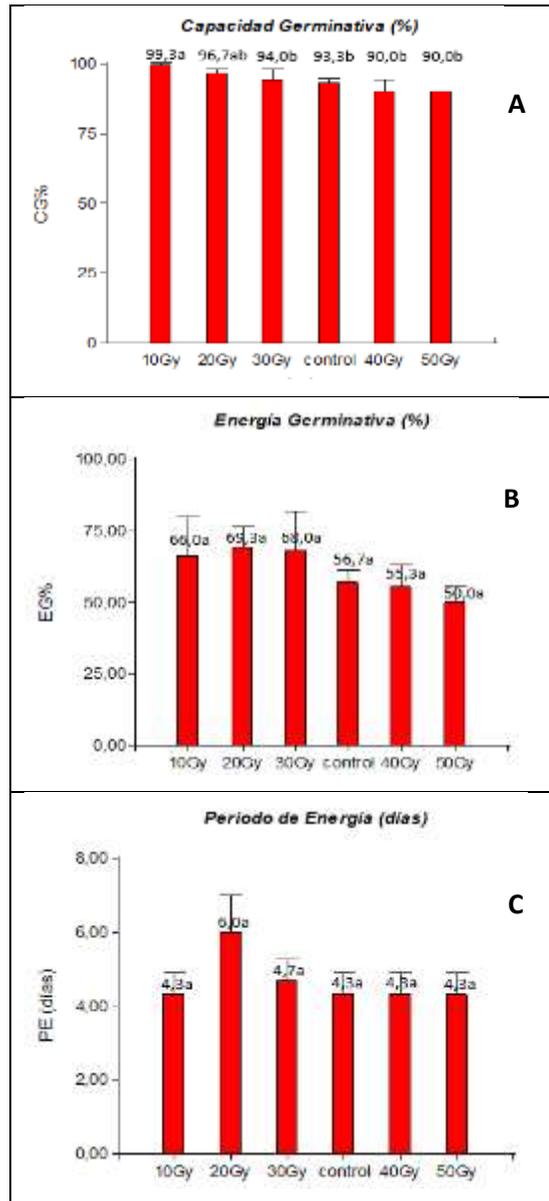


Figura 4. Valores medios por tratamiento, desviaciones estándar y diferenciación estadística para parámetros de germinación de semillas de *E. nitens* tratadas con distintas dosis de radiación gamma. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Tuckey, $\alpha=0,05$)

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el ensayo de germinación muestran que dosis de irradiación de 0 a 50 Gy no motivan efectos adversos sobre los parámetros de germinación de *E. nitens*; ninguna de ellas manifestó algún parámetro germinativo significativamente inferior al testigo sin irradiar. Por el contrario, se observa una diferenciación positiva de la dosis más baja (10 Gy), la que se hace evidente para la capacidad de germinación, pero que no exhibe diferencias respecto al testigo ni tratamientos restantes en términos de energía germinativa ni periodo de energía.

Dicho resultado por sí solo es interesante ya que viene a reforzar la idea de que las plantas no responden a la radiación ionizante mediante un modelo lineal (en que toda dosis es perjudicial) si no que presentan una respuesta que podría ser bifásica (bajas dosis podrían generar efectos positivos mientras que altas dosis ser dañinas) o no lineal (presentar una tolerancia a bajas dosis de radiación) (Agathokleous *et al.*, 2019).

La dosis más baja de entre las ensayadas (10 Gy) fue la única que mejoró en forma estadísticamente significativa la germinación de *E. nitens*, lo que, sumado a la relación inversa entre dosis y capacidad de germinación, sugiere que valores menores a 10 Gy serían aún más efectivos. En rigor, atendiendo a la tendencia general de las curvas de efecto hormético, a los valores de germinación obtenidos en el ensayo y al hecho de no haber probado dosis intermedias entre 0 y 10 Gy ni entre 10 y 20 Gy, se pueden presentar dos situaciones dependiendo de si la dosis óptima (DO) que maximiza el efecto positivo en la germinación se encuentra bajo o sobre los 10 Gy (Figura 5), la que sugiere que en general esta se encontraría bajo los 20 Gy. No obstante, debido a la gran capacidad de germinación de la especie y el alto nivel de germinación alcanzado con 10 Gy (99%), no se justifica el esfuerzo de probar dosis intermedias para encontrar el valor óptimo de irradiación que maximice la germinación, pues en la práctica ya no queda margen para mejorar esta característica.

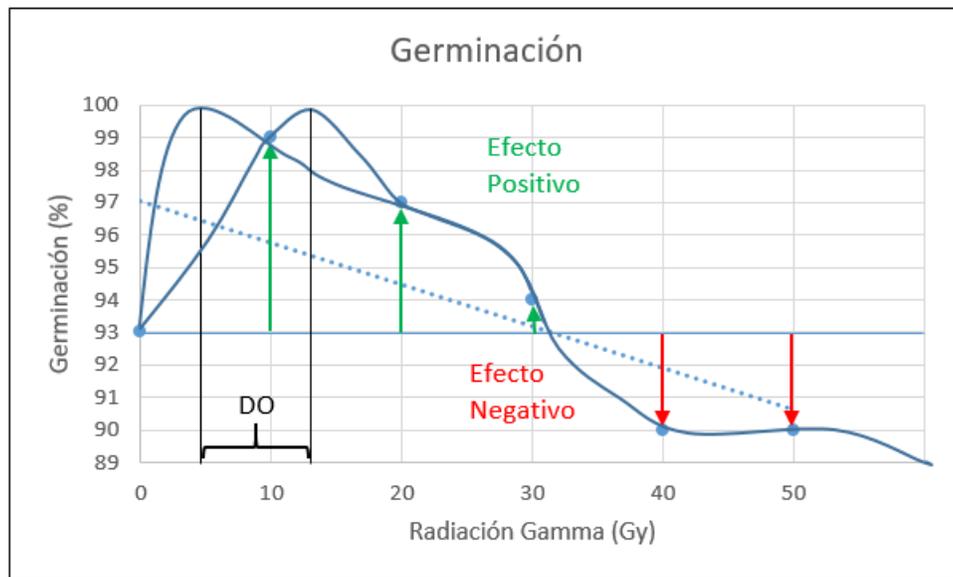


Figura 5. Posibles ubicaciones de la dosis óptima (DO) de irradiación para maximizar la germinación de semillas de *E. nitens*, de acuerdo a los resultados del ensayo evaluado

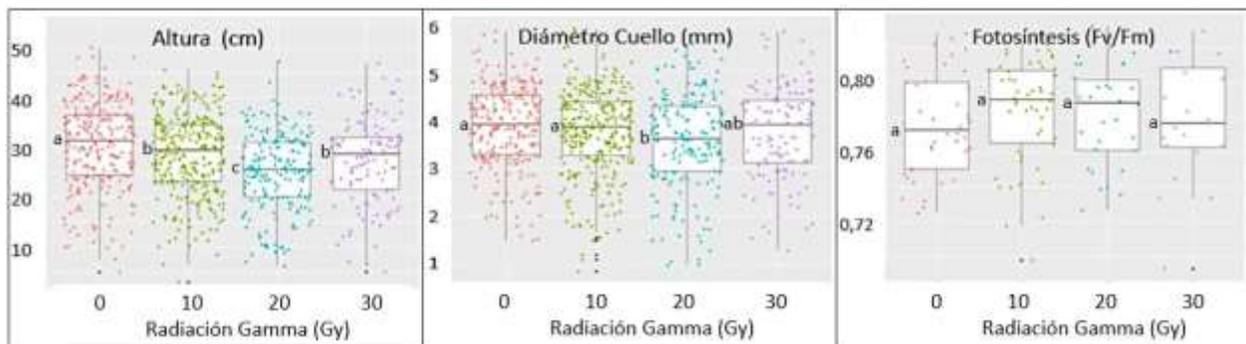
Dosis de radiación gamma inferiores a 10 Gy han producido efectos positivos y significativos sobre la germinación de semillas y crecimiento de plántulas de *Pinus nigra*, los que fueron obtenidos con dosis de irradiación de 0,88 a 8,88 Gy (Dudic, 1961 cit. por Ferreira *et al.*, 1980). Sin embargo, los resultados no son consistentes entre especies, por cuanto en *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* Da Vis (1962, cit. por Ferreira *et al.*, 1980) no detecta diferencias significativas de germinación respecto al testigo, en semillas tratadas con un amplio espectro de dosis de radiación gamma comprendido entre 2,8 y 57,3 Gy.

Ensayos análogos realizados con semillas irradiadas de otras especies forestales, muestran resultados diversos, los que por tratarse de especies diferentes no son directamente comparables con los aquí obtenidos, pero que igualmente constituyen referencias a considerar. Iglesias *et al.* (2010) tras evaluar el efecto de la aplicación de radiación gamma en dosis de 2, 5, 10, 15 y 20 Gy sobre la germinación de semillas de *Abies religiosa* concluyen que las dosis bajas no se diferencian del testigo sin irradiar, en tanto que las dosis mayores presentan un efecto detrimental sobre la germinación y otras características de las plántulas. Tales resultados resultan idénticos a los informados por Dada *et al.* (2018) respecto al efecto sobre el vigor de plántulas de café tratadas con radiación gama en dosis de entre 0 y 25 Gy.

Dosis inferiores a las evaluadas en este artículo fueron utilizadas por Ferreira *et al.* (1980) en *Araucaria angustifolia*, quienes observaron que dosis de hasta cerca de 5 Gy no tienen efecto significativo sobre la germinación de semillas, pero que las dosis menores (0,88 a 2,7 Gy) mejoraron el crecimiento de las plántulas después de 80 días de sembradas, respecto a las del testigo sin irradiar. En la misma especie, un estudio posterior de Modolo *et al.* (2011), donde se utilizan dosis de hasta 17,5 Gy, concluyen que solo las dosis más bajas (0,25 y 0,5 Gy) obtienen mejor germinación que el testigo, aun cuando esa diferencia no es estadísticamente significativa; y que a partir de 12,5 Gy el efecto resulta letal para las semillas.

En general, existen pocas referencias respecto al uso de radiación gamma en especies forestales y no es una técnica que se aplique en forma corriente. Iglesias *et al.* (2012) mencionan algunos antecedentes genéricos en especies forestales, entre ellos señalan que: dosis entre 0 y 900 Gy estimularían crecimiento de plántulas de *Salix nigra*; dosis de hasta 450 Gy estimularían germinación y tasa de crecimiento de *Tectona grandis*; radiación ionizante de baja intensidad reduciría el tamaño de los conos, germinación y altura de las plántulas de *Pinus rigida*; semillas irradiadas de *Quercus alba* tiene menor germinación y producen plantas con menor supervivencia y crecimiento en altura, y que además exhiben aberraciones visuales en la morfología de las hojas.

En el caso de *Eucalyptus nitens*, datos no publicados aportados por Gonzalez *et al.* (2021) indican que plantas de vivero obtenidas a partir de semillas irradiadas con 0, 10, 20 y 30 Gy presentaron diferencias estadísticamente significativas de altura y diámetro de cuello entre tratamientos, pero que ninguno de ellos fue mejor que el testigo sin irradiar; el mismo análisis señala que en términos de la proporción de la eficiencia fotosintética máxima, no existen diferencias con significancia estadística entre los distintos tratamientos y el testigo (Figura 6). Lo anterior estaría indicando que el positivo efecto observado en la dosis de 10 Gy sobre la germinación de *E. nitens*, no tendría incidencia en el desarrollo posterior de las plantas, confirmando la impermanencia del efecto hormético en el tiempo.



(Fuente: González *et al.*, 2021)

Figura 6. Efecto sobre la altura, diámetro de cuello y fotosíntesis de plantas de *Eucalyptus nitens* de una temporada de viverización, obtenidas a partir de semillas irradiadas con 0, 10, 20 y 30 Gy de radiación Gamma.

CONCLUSIONES

Se concluye que dosis de 10 Gy de radiación gamma tiene un efecto positivo para mejorar la germinación de semillas de *E. nitens*; y que dosis de 20 a 50 Gy no exhiben diferencias respecto al testigo sin irradiar.

Puesto que *E. nitens* germina abundantemente (más del 90% en semillas testigo), es cuestionable la aplicación práctica y el valor operativo de este resultado. Aun así, el constatar que la radiación gamma efectivamente puede mejorar la germinación resulta un antecedente de interés para repetir los ensayos, pero con especies que presenten dificultades de germinación, de modo de poder validar en qué medida la aplicación de radiación pueda ser, en la práctica, un eficiente tratamiento pregerminativo.

Los resultados preliminares orientan respecto a la magnitud de la radiación gamma a utilizar y confirman que dosis relativamente bajas serían las más efectivas para mejorar la germinación, pero atendiendo a las diferencias entre especies y a la diversidad de resultados existentes en la bibliografía, las dosis a probar deben ser definidas para cada especie en particular.

El presente estudio analizó la respuesta a los tratamientos de radiación sobre la germinación de semillas, tópico que junto a los efectos sobre el crecimiento de plántulas constituyen la mayoría de los estudios en esta materia. Futuras investigaciones deberán consolidar la información en estos procesos básicos, pero también ampliarse a los cambios a nivel fisiológico; bioquímico y/o molecular que puedan manipularse mediante radio-hórmesis.

AGRADECIMIENTOS

Al proyecto “Evaluación de la radio-hórmesis como metodología para el mejoramiento de parámetros de crecimiento en las especies *Eucalyptus nitens* y *Peumus boldus*” del Programa de Atracción e Inserción de Capital Humano Avanzado, de CONICYT; al proyecto CHI 5052 “Application of nuclear, molecular and biotechnological techniques to improve the adaptation and growth of native and exotic forest species facing climate change”, financiado por la Agencia Internacional de la Energía Atómica (IAEA); y a la empresa Forestal Mininco S.A., en la persona de la Sra. Verónica Emhart S., por el suministro de semillas para estas investigaciones.

REFERENCIAS

- Agathokleous, E., Kitao, M. & Calabrese, E.J. (2019). Hormesis: a compelling platform for sophisticated plant science. *Trends in Plant Science*, 24(4): 318-327. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.01.004>
- Calabrese, E. (2014). Hormesis: a fundamental concept in biology. *Microbial Cell*, 1(5): 145-149. <https://doi.org/10.15698/mic2014.05.145>
- Czabator, F.J. (1962). Germination value: an index combining speed and completeness of pine seed germination. *Forest Science*, 8(4): 386-396.
- Dada K.E., Anagbogu, C.F., Forster, B.P., Muyiwa, A.A., Adenuga, O.O., Olaniyi, O.O. & Bado, S. (2018). Biological effect of gamma irradiation on vegetative propagation of *Coffea arabica* L. *African Journal of Plant Science*, 12(6): 122-128. <https://doi.org/10.5897/AJPS2016.1504>
- FAO/IAEA. (1966). Effects of low doses of radiation on crop plants. Technical Report Series N° 64. Vienna. 58 p.
- FAO/IAEA. (2020). Mutant variety database. International Atomic Energy Agency. En: <https://mvd.iaea.org>. Consulta: 3 junio, 2020.
- Ferreira, C., Franco do Nascimento, V., Ferreira, M. & Vencovsky, R. (1980). Efeito de baixas doses de radiação gama na conservação do poder germinativo de sementes de *Araucaria angustifolia* (Bert). IPEF N° 21. Pp: 67-82.
- González, J., Jimenez, M. & García, M. (1999). Mejoramiento genético del pino real (*Pinus montezumae* Lamb). Parte I. En: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/022/32022749.pdf. Consulta: enero, 2021.
- Gonzalez, J., Koch, L. & Vera, T. (2021). Ensayo hormesis de *Eucalyptus nitens*. Presentación interna (no publicada). Instituto Forestal, Línea Mejoramiento Genético y Conservación. Concepción. 29 p.
- Gustafsson, A. & Mergen, F. (1964). Some principles of tree cytology and genetics. *Unasyuva*, 18(2-3): En: <http://www.fao.org/docrep/03650e/03650e02.htm#1.%20some%20principles%20of%20tree%20cytology%20and%20genetics>.
- Iglesias, L., Sánchez, R., Tivo, Y., Luna, M., Flores, N., Noa, J., Ruiz, C. & Moreno, J. (2010). Efecto de radiaciones gamma en *Abies religiosa* (Kunth) Schltd. et Cham. *Rev. Chapingo Ser. Cienc. For. Ambient.* Vol.16 N°1 Chapingo ene. /jun.
- Iglesias, L., Aguilar, O. & Bello, J. (2012). Current importance and potential use of low doses of gamma radiation in forest species. En: INTECH (Editor). 2012. Gamma radiation. Capítulo 13.
- ISTA. (2016). Reglas internacionales para el análisis de las semillas. Introducción a las reglas ISTA Capítulos 1-7, 9. International Seed Testing Association (ISTA), Zurichstr. Bassersdorf, Suiza. Online ISSN 2310-3655.
- Jankowicz-Cieslak, J. & Till, B. (2015). Forward and Reverse Genetics in Crop Breeding. En: Al-Khayri, J.M. *et al.* (Eds). *Advances in Plant Breeding Strategies: Breeding, Biotechnology and Molecular Tools*. Springer International Publishing. Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22521-0_8
- Kumar, J. (2012). Studies on induction of mutations in *Swertia chirayita* (Roxb. Ex. Flem.) H. Karst. Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Forestry (forest products).

- College of Forestry Dr. Yashwant Singh Parmar University of Horticulture and Forestry, Nauni, Solan, INDIA. 106 p.
- Luckey, T.D. & Lawrence, K.S. (2006). Radiation Hormesis: the good, the bad, and the ugly. International Hormesis Society. Dose-Response, 4(3): 169-190. <https://doi.org/10.2203/dose-response.06-102.Luckey>
- Mead, R., Curnow, R.N. & Hasted, A.M. (2002). Statistical methods in agriculture and experimental biology. 3rd ed. Ed. Chapman & Hall/CRC. Boca Raton, FL. 472 p.
- Modolo, D., Silva, L., Harder, M., Arthur, P. & Arthur, V. (2011). Effects of low doses of gamma irradiation on pine nuts (*Araucaria angustifolia*). In: International Nuclear Atlantic Conference, INAC. Bello Horizonte, MG, Brazil. 24-28 october, 2011.
- Mukhtar, A., Ghanim, A. & Forster, B. (2013). Techniques for acceleration of mutation breeding in crop plants. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs 2013, 7. ISBN: 978-3-902849-00-7.
- Piri, I., Babayan, M., Tavassoli, A. & Javaheri, M. (2011). The use of gamma irradiation in agriculture. African Journal of Microbiology Research, 5(32): 5806-5811. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.949>
- Riyal, D. (2011). Development of mutation-based breeding technology in forest tree species. Master of Science Thesis. Simon Fraser University, Department of Biological Science. Burnaby, BC, Canada. 245 p.
- Sokal, R. & Rohlf, FJ. (1980). Introducción a la bioestadística. Edición española. Editorial Reverte S.A. Barcelona, España.



ARTÍCULO

Influencia de medios de cultivo y niveles de pH en el crecimiento *in vitro* de 6 cepas de 3 especies del género *Suillus*.

Patricio Chung G.^{1*}

¹Instituto Forestal, Sede Biobío. pchung@infor.cl.

*Autor de correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.555>

Recibido: 09.12.2021; Aceptado 22.12.2021

RESUMEN

Se analizó el comportamiento *in vitro* de 6 cepas de las especies *Suillus luteus*, *S. granulatus* y *S. bellinii*, asociados a plantaciones de *Pinus radiata*. Se evaluó las variables crecimiento radial (CR), velocidad media de crecimiento (VMC) y biomasa (B) creciendo en los medios PDA (Papa Dextrosa Agar), MNM (Medio Melin-Norkrans) y BAF (Biotina Aneurina ácido Fólico) y en 5 niveles de pH (4,8, 5,3; 5,8; 6,3; y 6,8). A nivel de cepas se analizó las interacciones presentes entre los factores medio de cultivo y pH. Se observó comportamientos variables de cada cepa para las variables CR y VMC frente a los factores evaluados. Para la variable B, se observan promedios significativos para los medios de cultivo PDA y/o BAF, dependiendo de la cepa estudiada, con valores significativos de pH que variaron para cada cepa. Comparaciones entre valores del CR y de B, muestran alta correlación entre ellos para cepas de *S. granulatus*, baja para cepas de *S. luteus* y mediana a nula para cepas de *S. bellinii*.

Palabras claves: *Suillus*, cepas, pruebas de crecimiento, *in vitro*

SUMMARY

The *in vitro* behavior of 6 strains of the species *Suillus luteus*, *S. granulatus* and *S. bellinii*, associated with *Pinus radiata* plantations, was analyzed. The variables radial growth (CR), average growth speed (VMC) and biomass (B) growing in PDA (Potato Dextrose Agar), MNM (Melin-Norkrans Medium) and BAF (Biotin Aneurin Folic acid) media and in 5 pH levels (4.8, 5.3, 5.8, 6.3, and 6.8) were evaluated. At the strain level, the interactions between the culture medium and pH levels were analyzed. Variable behaviors of each strain were observed for the CR and VMC variables. For variable B, statistically significant differences were observed for the PDA and / or BAF culture media, depending on the strain studied, with significant pH values that varied for each strain. Comparisons between CR and B values show high correlation between them for *S. granulatus* strains, low for *S. luteus* strains and medium to null for *S. bellinii* strains.

Keywords: *Suillus*, strains, growth testing, *in vitro*

INTRODUCCIÓN

El uso de los recursos micológicos del bosque comenzó con los pueblos originarios que los utilizaban para alimentación. En la actualidad este uso de ha masificado, llegando a constituir los hongos silvestres comestibles un recurso natural de gran importancia económica y social.

La riqueza micológica nativa se vio aumentada con la introducción de especie forestales como *Pinus radiata*, en cuyas plantaciones se desarrolla una variedad de especies fúngicas, dentro de las cuales destacan *Lactarius deliciosus* y especies del género *Suillus*. Estas especies fúngicas acompañantes del pino han sido de gran importancia en el contexto social y económico de muchas familias rurales, y en la actualidad representan para el país exportaciones comerciales con valores cercanos a los US\$3,8 MM para *Suillus spp.* y US\$137 mil para *Lactarius deliciosus* (INFOR, 2020).

Los hongos del género *Suillus* conviven simbióticamente con las raíces de árboles de *Pinus radiata*, principal especie plantada en Chile. Sin embargo, para asegurar su presencia resultan importantes los trabajos de micorrización, especialmente en la etapa de viverización de las plantas.

En la actualidad, los hongos comestibles del género *Suillus*, y en especial las especies de mayor presencia en plantaciones de pino como son *S. luteus*, *S. granulatus* y *S. bellinii*, constituyen un recurso valioso, cuyo uso como alimento o insumo comercial ha adquirido gran importancia en las zonas rurales, gracias a la necesidad de cubrir el aumento en la demanda de productos de tipo orgánico y de tipo funcional. Su recolección es desarrollada por miles de personas y/o familias que ven en esta actividad una forma de mejorar su calidad de vida, siendo, el eslabón principal de la cadena de comercialización

Las especies del género *Suillus* son hongos simbiotes catalogado dentro del grupo de los hongos pioneros (Bruns *et al.*, 2002; Blanco *et al.*, 2012) del tipo ectomicorrícico y que desarrollan su ciclo de vida en bosques de pino presentes en buena parte de nuestro territorio nacional. La proliferación de sus cuerpos fructíferos ocurre principalmente en los meses de otoño, pudiendo aparecer en menor medida en la época de primavera, cuando las condiciones ambientales permiten su desarrollo. Además de su importancia económica como PFNM, poseen como todo hongo micorrícico una importancia ecológica dentro de los ecosistemas forestales, por lo que cualquier actividad dentro del bosque o eventos que sean causados en forma natural o antrópica que alteren el suelo tendrían un importante impacto en la supervivencia y fructificación de estos hongos.

La relación simbiótica entre hongos y especies forestales constituye una ventajosa oportunidad para implementar líneas de investigación y desarrollo innovativos, que conjuguen la recuperación de suelos degradados con la restauración y enriquecimiento del bosque, mejorando el desempeño de las plantaciones, con la generación de productos intermedios de alto valor económico, ecológico y social, como son los hongos ectomicorrícicos comestibles. Sin embargo, la producción natural de estos hongos en el bosque es variable, de modo que el interés por obtener una producción alta y estable, ha motivado iniciativas para cultivarlos mediante el establecimiento de plantas inoculadas con cepas adaptadas a condiciones medioambientales específicas (Chung, 2020).

En relación a lo anterior, y para llegar a determinar las condiciones ideales para que se establezca y desarrolle el hongo en conjunto con la planta, se ha hecho necesario una serie de investigaciones en torno al desarrollo de una planta ideal inoculada con el hongo, que pueda desarrollar esta simbiosis conjuntamente con el desarrollo de hongos comestibles, previo y posterior a las labores de plantación.

Para llevar a cabo los trabajos de inoculación de plantas con hongos ectomicorrícicos específicos, se deben realizar un conjunto de investigaciones para desarrollar protocolos que posibiliten el contacto y una exitosa unión hongo-planta dando lugar a las formaciones ectomicorrícicas. Para ello, uno de los aspectos importantes, es la elaboración de material inoculante y dentro de este, la cepa de hongo previamente seleccionada y masificada bajo parámetros ambientales y químicos fijadas en laboratorio, como son el pH y la disponibilidad de nutrientes.

Para tales efectos se requiere disponer de un banco de cultivos puros con cepas nacionales, donde abastecerse y seleccionar material de acuerdo a características específicas de uso. Por este motivo, el Instituto Forestal ha establecido un banco de cepas, con el propósito de generar una masa crítica para la elaboración de productos que permitan generar diversos formatos de material inoculante fúngico, que puedan ser utilizados en la producción de plantas y posibilitar así mejorar la rentabilidad de plantaciones forestales a través de una producción de hongos ectomicorrícicos comestibles de alto valor económico y social.

Por lo tanto, para los trabajos de inoculación con hongos micorrícicos, se requiere de inoculantes fúngicos a gran escala, por estas razones es necesario definir la composición óptima del medio de cultivo para cada hongo tomando en cuenta las diferentes cepas una gran variación de condiciones del suelo (Islam & Ohga, 2013).

Consecuentemente, el presente trabajo busca investigar el desempeño de 3 especies del género *Suillus* (*S. luteus*, *S. granulatus* y *S. bellinii*) y sus respectivas cepas (2 cepas por especie) bajo diferentes condiciones controladas de cultivo en condiciones *in vitro*, evaluando el efecto de 3 medios de cultivo (PDA, MMN y BAF) y 5 niveles de pH (4,8; 5,3; 5,8; 6,3 y 6,8) sobre el crecimiento radial (CR), velocidad media de crecimiento (VMC) y peso seco de la biomasa (B) producida por cada una de las especies y cepas.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizaron 2 cepas de cada uno de los hongos comestibles ectomicorrícicos *Suillus luteus* L. Gray, *S. granulatus* (L.) Roussel y *S. bellinii* (Inz.) Kuntze (Figura 1), procedentes del banco de cepas del Instituto Forestal de Chile (INFOR) y cuyo material fue colectado desde plantaciones de *Pinus radiata* en diferentes regiones de nuestro país (Cuadro 1).

Los cultivos puros fueron obtenidos de aislados usando la técnica descrita por Molina y Palmer (1982), generados a partir del sombrero de un esporocarpio joven y cultivados sobre medio MMN en agar (Melin-Norkrans modificado), bajo oscuridad y a temperatura de 23°C.



Figura 1. Imágenes de *Suillus luteus* (a), *S. granulatus* (b) y *S. bellinii* (c) en su ambiente bajo plantaciones de pino

En una etapa preliminar, el material original de cada cepa fue activado y masificado en discos de Petri con medio Extracto de Malta- Agar (EMA) al 2%. Para ello, se extrajo desde el material original discos de 5 mm, los que fueron puestos en el centro de placas petri con 20 ml del medio nutritivo durante 30 días, período en el cual se generó suficiente tejido micelial para ser utilizados en la instalación del estudio respectivo.

Para la instalación del estudio, los medios de cultivos usados fueron: (i) PDA, extracto de papa dextrosa agar (Difco, Bencton Dickinson and Company, USA); (ii) MNM, Melin- Norkrans (Marx, 1969); y (iii) BAF, Biotina Aneurina Ácido Fólico (Moser, 1960). Sobre ellos se evaluó el comportamiento de cada cepa en relación a su crecimiento radial (CR) en milímetros, velocidad media de crecimiento (VMC) en milímetros por día y biomasa (B) en miligramos y en 5 niveles de pH (4,8; 5,3; 5,8; 6,3 y 6,8), usando un diseño estadístico completamente aleatorizado con cinco repeticiones de cada tratamiento.

Cuadro 1. Cepas y antecedentes de las especies utilizadas (*S. luteus*, *S. granulatus* y *S. bellinii*)

Especie	Código de cepa	Región, Provincia, Comuna	Ubicación		Tipo de Suelo	Hospedante	Edad rodal (años)
			Lat (°S), Long (°O)	Altitud (msnm)			
<i>Suillus luteus</i>	IF1618002	Ñuble, Itata, Coelemu	36°28'41,90" S 72°42'15,34" O	29	Franco arenoso	<i>P. radiata</i>	8
	IF732003	Maule, Talca, Constitución	35°34'20,94" S 72°36'08,20" O	25	Franco arcilloso arenoso	<i>P. radiata</i>	5
<i>Suillus granulatus</i>	IF937002	Araucanía, Cautín, Nueva Imperial	38°42'52,23" S 73°01'34,57" O	65	Limo arcilloso	<i>P. radiata</i>	8
	IF1616002	Ñuble, Diguillín, Quillón	36°42'10,86" S 72°30'27,43" O	536	Franco arenoso	<i>P. radiata</i>	10
<i>Suillus bellinii</i>	IF633001	O'Higgins, Cardenal Caro, Marchihue	34°21'29,70" S 71°53'46,70" O	440	Franco arcilloso	<i>P. radiata</i>	15
	IF713001	Maule, Linares, Longaví	36°10'58,02" S 71°32'12,89" O	332	Franco limoso	<i>P. radiata</i>	4

Los medios de cultivo utilizados se esterilizaron en autoclave a 121°C, a 1, 2 atm de presión, por 30 minutos, ajustando previamente sus valores respectivos de pH con HCL o KOH 1N y con mediciones

realizadas con un peachímetro marca Thermo Scientific Orion modelo Star A111. Finalizado el proceso de esterilización, estos fueron llevados a una Cámara de Flujo Laminar marca Filtromet modelo H24302, de fabricación nacional, donde se realizó el vaciado de los medios de cultivo a discos de Petri de 90 x 15 mm, ayudados por una jeringa de 25 ml, vertiendo 20 ml de medio en cada disco. Posteriormente, se dejó enfriar en ambiente estéril hasta su uso.

El proceso de instalación de los ensayos se realizó con la ayuda de un sacabocado que permitió obtener segmentos circulares de 5 mm desde las placas que contenían el material miceliar madre. Estos segmentos fueron dispuestos en el centro de los discos de Petri correspondientes a cada tratamiento, procediendo luego a sellarlos con cintas de parafilm y marcarlos con el nombre de la especie, código de cepa, número de repetición, medio de cultivo, nivel de pH y fecha de instalación.

Una vez finalizada la operación de instalación de los ensayos en los discos con los segmentos miceliares respectivos, estos se ingresaron a una Cámara de Crecimiento marca Forma Scientific modelo 3744, en oscuridad y a 24°C de temperatura por 30 días.

Para realizar las mediciones de crecimiento radial (CR) se utilizó un pie de metro digital marca Ubermann. Cada medición radial se realizó en 4 direcciones a partir del centro donde se ubicó el disco de micelio, registrándose el crecimiento de las cepas en cada uno de los discos de cada tratamiento cada 3 días por un lapso de 30 días.

Para obtener los valores de biomasa seca (B) al final del período de evaluación, se procedió a extraer desde los discos de Petri, el micelio obtenido junto con el medio con agar.

Para eliminar el agar, se aplicó la metodología utilizada por Santiago-Martínez *et al.* (2003), que consistió en eliminar el agar por calentamiento en baño maría y luego enjuagando la colonia con agua caliente, para después secarla en estufa a 60 °C por 48 horas hasta peso constante.

Posteriormente se pesó cada muestra, descontando el peso del papel y del inóculo inicial, obteniendo así la biomasa seca producida en cada tratamiento (Figura 2).

Para determinar la velocidad media de crecimiento (VMC) de las cepas, se usó los datos obtenidos de mediciones de crecimiento radial cada 3 días por 30 días, los que se ajustaron mediante una ecuación de regresión lineal para calcular la pendiente de la curva de crecimiento y obtener el promedio de crecimiento del hongo por día (Santiago- Martínez *et al.*, 1995).

El análisis de los datos se realizó mediante análisis de varianza (ANDEVA), utilizando para ello, el software estadístico INFOSTAT versión 2015p.

La homogeneidad de varianza se evaluó mediante la prueba de Levene ($P \leq 0,05$). En tanto que el supuesto de normalidad de los residuos se evaluó a través de la prueba de Shapiro-Wilks ($P \leq 0,05$).

Por otro lado, para detectar diferencias significativas entre los tratamientos, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (Montgomery, 1984), con $P \leq 0,05$.

Para visualizar la relación entre las variables analizadas, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson que indica el grado de linealidad existente entre pares de variables.

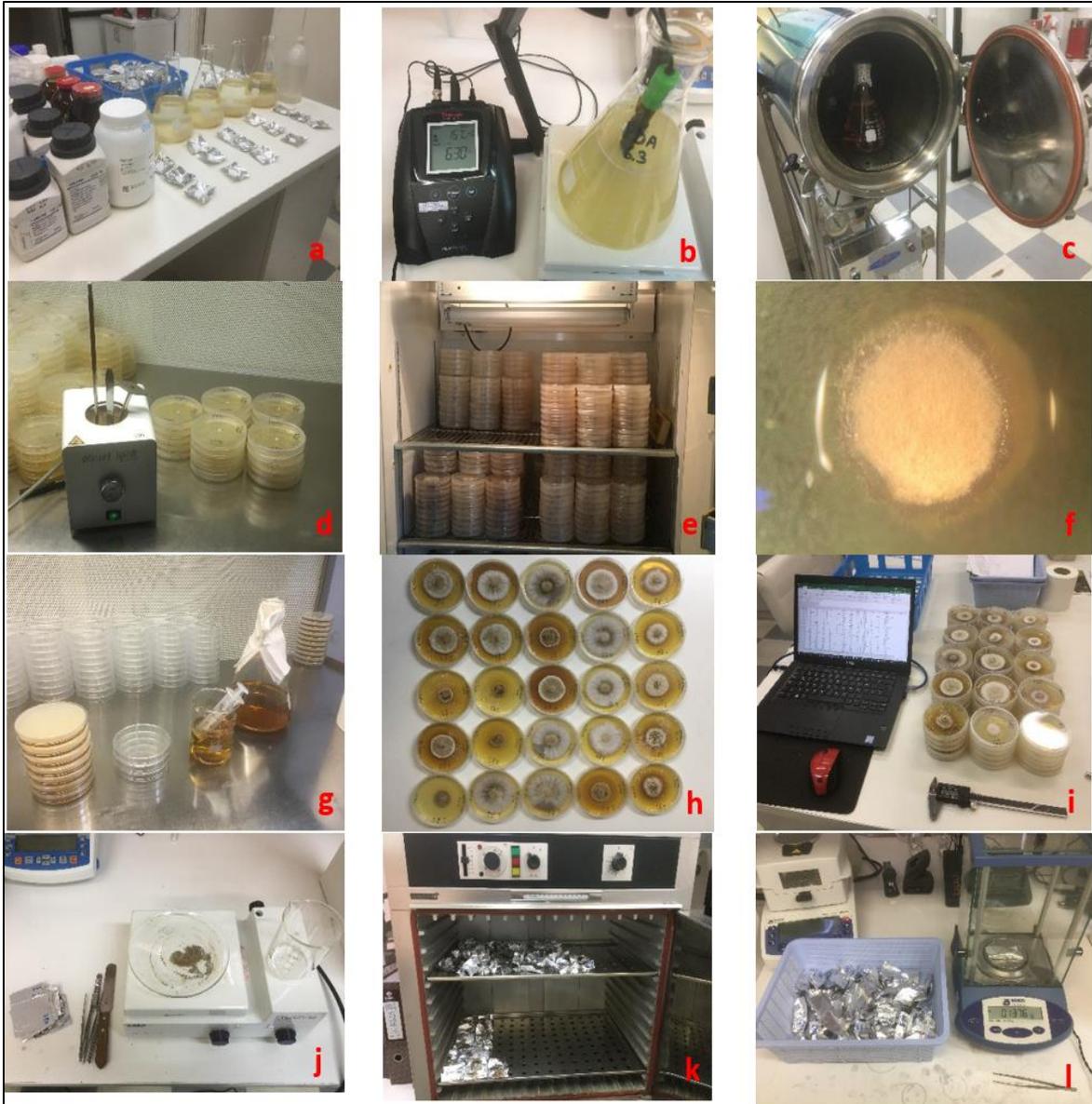


Figura 2. Preparación de los medios de cultivo (a); Ajuste de pH de los medios de cultivo (b); Esterilización de medios de cultivo en autoclave (c); Estableciendo los tratamientos con la ayuda de un sacabocado (d); Discos de petri con los diferentes tratamientos en cámara de crecimiento a 24°C (e); Segmento circular de 5 mm extraído con sacabocado y utilizado como inoculante (f); Vaciado de medios a discos de Petri (g); Aspecto de crecimiento de cepa de *S. granulatus* a distintos PH en medio PDA (h); Medición del crecimiento radial de cada cepa y su tratamiento (i); Extracción de agar desde micelio crecido en discos de Petri (j); Colocación de micelio puro en papel de aluminio y secado a 60 °C pos 48 horas (k); Pesaje de micelio puro en papel de aluminio previamente pesado (l).

RESULTADOS

Análisis de *Suillus luteus*

-A nivel de cepas

Los ANDEVA de los datos obtenidos para las cepas IF732002 y IF1618002, arrojan interacciones significativas entre los factores nivel de pH y medio de cultivo con efectos sobre las variables crecimiento radial (CR) y velocidad media de crecimiento (VMC), mientras que para el peso seco de la biomasa (B), sólo se observó interacciones para la cepa IF732002 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Significancia estadística del análisis de varianza (ANDEVA) para los valores medios obtenidos de las variables crecimiento radial (CR), velocidad media de crecimiento (VMC) y biomasa (B) para cepas de *Suillus luteus*.

Factor	Cepa IF732002			Cepa IF1618002		
	CR (mm)	VMC (mm/día)	B (mg)	CR (mm)	VMC (mm/día)	B (mg)
Medio	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*	0,0010*	< 0,0001*	0,2884
pH	< 0,0001*	< 0,0001*	0,0001*	0,6073	0,6714	0,6571
Medio x pH	0,0025*	0,0042*	0,0341*	0,0303*	0,0180*	0,2290

* Efectos significativos ($P \leq 005$)

-Crecimiento Radial: La cepa IF732002 evidenció mayor crecimiento en el medio PDA a pH 5,8, sin diferenciarse significativamente del observado en PDA a pH 5,3 y 6,3 y en MMN a pH 6,8, observándose además una baja en el crecimiento a pH 4,8 en los tres medios utilizados.

Respecto al pH, se presentó mayor crecimiento a 5,8, con diferencias significativas sólo con valores de 5,3 y 4,8. A nivel de medios de cultivo, PDA presentó el mejor desempeño. Para la cepa IF1618002 se observó mayor crecimiento en el medio MMN a pH 6,3, en tanto el medio BAF a pH 6,8 presentó el menor crecimiento entre todos los tratamientos aplicados. Respecto al pH, este no presentó diferencias significativas entre los diferentes niveles (cuadro 3).

-Velocidad Media de Crecimiento: Para la cepa IF32002 el comportamiento fue similar al observado en el crecimiento radial; crecimiento más rápido en el medio PDA a pH 5,8, pero sin presentar diferencias significativas a pH 5,3 y 6,3 dentro del mismo medio, y tampoco con los medios MMN a pH 6,8 y BAF a pH 5,8. La menor velocidad de crecimiento micelial se observó a pH 4,8 diferenciándose significativamente de los demás niveles evaluados.

En medio PDA el crecimiento fue significativamente más rápido que en los restantes. En el caso de la cepa IF 1618002, no se observó diferencias significativas entre los niveles de pH dentro de cada medio de cultivo, pero sí entre ellos.

La mayor VMC se obtuvo en el medio MMN a pH 6,8, siendo el medio MMN significativamente mejor que los medios restantes independientemente del nivel de PH (cuadro 3).

-Biomasa: En la cepa IF732002, la mayor cantidad de materia seca se obtuvo en el medio BAF a pH 5,8, con rendimientos también altos para los medios PDA y BAF, en comparación al medio MMN que obtuvo los peores promedios.

No se observó diferencias entre los tratamientos que consideran al medio PDA con pH 5,3 y 6,3 y el medio BAF con pH 5,3 y 6,8, los cuales no se diferencian significativamente del tratamiento con mayor producción de biomasa seca.

La biomasa fue significativamente menor a pH 4,8. Con respecto a la cepa IF1618002, esta no presentó diferencias significativas entre los diferentes tratamientos (cuadro 3).

-Correlaciones entre variables: En ninguna de las cepas se observó una correlación elevada entre la producción de biomasa seca con el crecimiento radial ni con la velocidad media de crecimiento, observándose coeficientes de correlación que fluctúan entre 0,27 y 0,35.

Cuadro 3. Efecto del medio de cultivo y pH sobre los valores medios (m) y desviaciones estándar (DE) de las variables crecimiento radial, velocidad media de crecimiento y producción de biomasa a nivel de cepas de *Suillus luteus*.

Cepa	Factores			Crecimiento radial (mm)						Velocidad media de crecimiento (mm/día)			Biomasa (mg)					
	Medio	pH	Medio*Ph	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph		Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph		Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph				
						m±DE	m±DE			m±DE	m±DE			m±DE	m±DE			
IF732002 (n=75)	PDA (n=25)	4.8 (n=5)	4.8 (n=5)	23,48 ± 4,00	15,88 ± 2,89	19,04	1,04	0,78 ± 0,14	0,51 ± 0,11	0,61	0,07	110,42 ± 12,49	78,46 ± 32,35	103,98	10,91			
			5.3 (n=5)			23,41	2,06			0,81	0,08			113,80	15,16			
			5.8 (n=5)			28,65	1,63			0,95	0,08			115,12	7,86			
		5.3 (n=15)	6.3 (n=5)			20,39 ±	24,15			3,43	0,69 ± 0,12			0,81	0,09	103,4 ± 27,38	113,47	9,15
			6.8 (n=5)			3,25	22,14			3,93				0,74	0,13		105,74	17,57
			4.8 (n=5)			14,99	1,28			0,49				0,07	46,22		12,46	
	MMN (n=25)	5.8 (n=15)	5.3 (n=5)	19,86 ±	23,75 ±	0,68 ± 0,14	0,70	0,08	67,04 ± 14,77	113,54 ±		73,12						
			5.8 (n=5)	3,53	4,38		0,68	0,08		70,96		7,20						
			6.3 (n=5)	19,55	2,13		0,67	0,08		63,22		6,77						
		6.3 (n=15)	6.8 (n=5)	21,1 ±	24,53		2,23	0,71 ± 0,14		0,85	0,10	102,18 ± 38,51	81,66	7,87				
			4.8 (n=5)	4,19	13,60		2,57			0,44	0,10		85,18	34,90				
			5.3 (n=5)	17,58	2,91		0,58			0,10	123,28		22,75					
BAF (n=25)	6.8 (n=15)	5.8 (n=5)	18,04 ±	21,18 ±	0,59 ± 0,15	0,75	0,12		121,85 ± 35,19	154,54	20,43							
		6.3 (n=5)	4,32	4,16		0,71	0,16			101,26 ±	129,86							
		6.8 (n=5)	16,86	1,30		0,55	0,04			116,39	9,63							
	IF1618002 (n=75)	PDA (n=25)	4.8 (n=15)	4.8 (n=5)		19,07 ±	18,49 ±	0,65 ± 0,17		0,61	0,08	91,64 ± 22,81	90,52	14,64				
				5.3 (n=5)		5,22	3,25			0,13	0,10		20,97	16,31				
				5.8 (n=5)		21,33	6,93			0,73	0,23		98,56	24,54				
5.3 (n=15)			6.3 (n=5)	20,1 ±	16,42	5,41	0,69 ± 0,17		0,55	0,17	90,05 ± 23,35		79,02	29,72				
			6.8 (n=5)	4,41	16,97	4,19			0,55	0,14			81,64	20,40				
			4.8 (n=5)	20,76	3,87	0,72			0,18	70,74			10,08					
MMN (n=25)	5.8 (n=15)	5.3 (n=5)	22,16 ±	19,82 ±	0,81 ± 0,23	0,69		0,21	81,53 ± 22,80	70,90		18,80						
		5.8 (n=5)	4,95	5,51		0,69		0,23		85,21		31,71						
		6.3 (n=5)	20,24	6,47		0,75		0,33		78,18		32,13						
	6.3 (n=15)	6.8 (n=5)	25,15	5,62		0,93	0,21	95,56		26,74								
		4.8 (n=5)	24,68	1,73		0,95	0,16	92,27		14,98								
		5.3 (n=5)	20,66 ±	17,18		2,59	0,72 ± 0,23	0,57		0,08	95,11 ± 29,00	83,14	31,19					
4.8 (n=5)	5,82	17,24	2,17	0,56	0,08	90,80		20,16										
5.3 (n=5)	17,49 ±	17,89	2,93	0,58 ± 0,12	0,60	0,11		91,35 ± 30,91	78,88	39,39								
6.8 (n=5)	3,13	18,79 ±	20,42		0,66 ±	0,68			89,04 ±	110,46								
5.8 (n=5)	5,27	14,73	2,88		0,25	0,13			24,36	26,75								
6.3 (n=5)	14,73	2,88	0,49		0,13	93,20			36,51									

(*) Valores medios con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

-A nivel de especie

-Crecimiento Radial: El mejor desempeño se observó en medio MMN a pH 6,8 y en PDA a 5,8. En MMN el crecimiento estuvo directamente relacionado con el nivel de pH, mientras que en PDA y BAF, los mayores crecimientos se concentraron en los valores intermedios de pH. El menor crecimiento se obtuvo en BAF a pH 6,8, sin diferenciarse significativamente de los valores obtenidos en los restantes niveles de pH. Considerando sólo el pH, el ajuste de los medios a 4,8, fue el que presentó el menor crecimiento con diferencias significativas con los demás valores de pH, a excepción del pH 6,8 (cuadro 4).

-Velocidad Media de Crecimiento: Esta variable obtuvo su mayor valor en el medio MMN a pH 6,8, siendo el único medio que presentó diferencias al interactuar con los diferentes niveles de pH. Los menores valores se ubicaron en los valores extremos de pH del medio BAF. La velocidad media de crecimiento tuvo un comportamiento muy parecido al crecimiento radial, mostrando estas dos variables un desarrollo menor en el medio BAF para los valores extremos de pH. De lo observado a nivel de la variable pH, se observa que el ajuste a 4,8, mostró el menor rendimiento, con diferencias significativas con los demás valores. A nivel de medios de cultivo, los medios MMN y PDA, tuvieron los mejores desempeños para esta variable (cuadro 4).

-Biomasa: La mayor biomasa seca se obtuvo en los medios BAF y PDA, los cuales no presentaron diferencias significativas para todo el rango de pH dentro de ellos, como tampoco entre ellos, con un máximo en el medio BAF a pH 6,3. Se agrega también el medio MMN a pH 6,8, el cual tampoco presentó diferencias con los promedios de los otros medios de cultivo (cuadro 4). A nivel de pH, el ajuste a 4,8 presentó el menor monto en materia seca, presentando diferencias significativas sólo con los ajustes a pH 5,8 y 6,3 (cuadro 4).

Correlaciones entre Variables: Existe una correlación muy débil (0,13) entre CR y B y casi inexistente (0,02) entre VMC y B.

Cuadro 4. Efecto del medio de cultivo y pH sobre los valores medios (m) y desviaciones estándar (DE) de las variables crecimiento radial, velocidad media de crecimiento y producción de biomasa para *Suillus luteus*.

Factores			Crecimiento radial (mm)			Velocidad media de crecimiento (mm/día)			Biomasa (mg)				
Medio	pH	Medio*Ph	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE		
PDA (n=50)	4.8 (n=30)	4.8 (n=10)	21,27 ± 5,11 a	17,18 ± 3,30 b	18,29 1,90 bc	0,72 ± 0,17 a	0,57 ± 0,13 b	0,61 0,07 bcde	101,03 ± 20,51 a	79,96 ± 26,83 b	97,25 14,09 abcd		
		5.3 (n=10)		23,25 3,21 ab	24,99 6,12 a		0,81 0,08 abc	0,84 0,20 ab		111,13 15,11 abc			
		6.3 (n=10)		24,99 6,12 a	24,99 6,12 a		0,84 0,20 ab	106,84 19,27 abc					
	5.3 (n=30)	6.3 (n=10)		20,24 ± 3,81 a	20,28 5,90 abc		19,55 4,70 abc	0,69 ± 0,14 a		0,68 0,19 abcde	0,65 0,16 bcde	96,73 ± 25,91 ab	96,25 27,56 abcd
		4.8 (n=10)		17,87 4,08 bc	17,87 4,08 bc		0,60 0,17 cde	58,48 16,77 d					
		5.8 (n=10)		21,01 ± 4,41 a	21,79 ± 5,28 a		20,15 4,49 abc	0,74 ± 0,20 a		0,74 ± 0,20 a	0,72 0,23 abcde	0,80 0,21 abcd	74,28 ± 20,37 b
MMN (n=50)	5.8 (n=30)	5.3 (n=10)	21,01 ± 4,41 a	21,79 ± 5,28 a	20,15 4,49 abc	0,74 ± 0,20 a	0,74 ± 0,20 a	0,69 0,15 abcde	74,28 ± 20,37 b	99,37 ± 37,00 a	74,57 22,28 cd		
		5.8 (n=10)	20,15 4,49 abc	20,15 4,49 abc	0,72 0,23 abcde		74,57 22,28 cd						
		6.3 (n=10)	22,35 4,98 ab	22,35 4,98 ab	0,80 0,21 abcd		79,39 25,08 bcd						
	6.3 (n=30)	6.3 (n=10)	20,88 ± 4,99 a	24,60 1,88 a	15,39 3,08 c		0,71 ± 0,19 a	0,90 0,14 a		0,50 0,11 e	106,6 ± 36,22 a	98,65 ± 33,69 a	86,96 12,59 abcd
		4.8 (n=10)	15,39 3,08 c	15,39 3,08 c	0,50 0,11 e		84,16 31,22 abcd						
		5.3 (n=10)	17,41 2,43 bc	17,41 2,43 bc	0,57 0,09 de		107,04 26,53 abc						
6.8 (n=30)	5.8 (n=10)	17,76 ± 3,74 b	19,98 ± 4,82 ab	20,22 3,90 abc	0,59 ± 0,13 b	0,67 0,14 abcde	0,67 0,14 abcde	106,6 ± 36,22 a	95,15 ± 22,32 ab	116,71 49,65 ab			
	6.3 (n=10)	20,00 4,12 abc	20,00 4,12 abc	0,66 0,15 bcde	120,30 36,45 a								
	6.8 (n=10)	15,80 2,39 c	15,80 2,39 c	0,52 0,10 e	104,80 27,98 abc								

(*) Valores medios con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Análisis de *Suillus granulatus*

-A nivel de cepa

El análisis de los datos evidencia interacciones con diferencias significativas de los factores medio de cultivo y nivel de pH sobre las variables respuesta CR, VCM y B (cuadro 5).

Cuadro 5: Significancia estadística del análisis de varianza (ANDEVA) para los valores medios obtenidos de las variables crecimiento radial (CR), velocidad media de crecimiento (VMC) y biomasa (B) para cepas de la especie *Suillus granulatus*.

Factor	Cepa IF937001			Cepa IF 1616002		
	CR (mm)	VMC (mm/día)	B (mg)	CR (mm)	VMC (mm/día)	B (mg)
Medio	0,0006*	0,001*	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*
pH	< 0,0001*	0,0001*	0,0002*	0,0005*	0,0071*	0,0001*
Medio x pH	0,0023*	0,0107*	0,0152*	0,0056*	0,0367*	0,0074*

* Efectos significativos ($P \leq 0,05$)

-Crecimiento Radial: Para la cepa IF937002, se obtuvo el mayor crecimiento radial en el medio PDA a pH 5,8, aunque sin diferenciarse de los resultados obtenidos en medio PDA y BAF desde 5,3 a 6,3, y en MMN a pH 6,8. El crecimiento en medio MMN no fue influenciado por los diferentes niveles de pH. En promedio, en todos los medios, el pH 4,8 tuvo menor crecimiento. A nivel de pH, los valores de 5,8, 6,3 y 5,3 lograron mayor desarrollo. A nivel de medios de cultivo, PDA y BAF presentaron los mayores crecimientos, diferenciándose significativamente de MMN. Por su parte, para la cepa IF1616002, se apreciaron los valores más altos en medios BAF y PDA, entre rangos de pH de 5,3 a 6,8 para el primero y de 5,3 a 5,8 más 6,8 para el segundo. Los valores significativamente menores fueron obtenidos en el medio MMN para pH 4,8 y 5,3. Se observó, además, un efecto nulo del pH en los crecimientos obtenidos en los medio MMN y PDA. Respecto al pH, los ajustes entre 5,3 y 6,8, generaron el mayor crecimiento radial, en tanto que, entre los medios de cultivo, el mejor resultado se obtuvo con BAF (cuadro 6).

-Velocidad Media de Crecimiento: Exhibió un comportamiento similar a la variable CR; el medio PDA a pH 5.8 presenta la mayor velocidad para la cepa IF937002, diferenciándose significativamente de los promedios obtenidos en pH 4,8 y 6,8 para el mismo medio, en BAF a pH 4,8 y en MMN a pH entre 4,8 y 5,8. En el medio MMN se observa un nulo efecto de los diferentes ajustes de pH en los resultados obtenidos. Respecto al pH se observa una mejor respuesta para valores entre 5,3 y 6,8, mientras que a nivel de medio de cultivo, los medios PDA y BAF son los que presentan crecimiento más rápido. Para la cepa IF1616002, el medio BAF a pH 5,8 permitió la mayor velocidad de crecimiento, pero el igual que la cepa anterior, no se diferencia de la velocidad obtenida en PDA y BAF con diferentes rangos de pH. Se

observó un nulo efecto de los diferentes ajustes de pH en los medios MMN y PDA y los crecimientos más lentos en MMN, y en pH 4,8 y 5,3.

A nivel de pH, el mejor desempeño se observa para valores entre 5,3 y 6,8. Para el factor medio de cultivo, los medios MMN y PDA presentaron los promedios más altos, diferenciándose significativamente con respecto al medio MMN (cuadro 6).

-Biomasa: En la cepa IF937002 el medio BAF a pH 5,8 exhibe la mayor producción de materia seca, sin diferenciarse significativamente de la producción obtenida con mismo medio a pH 5,3 y 6,3, ni con PDA a pH entre 5,3 y 6,3. Los montos de materia seca más bajos se presentan en los tratamientos en base a MMN, como también para valores que fueron ajustados a pH 4,8 en los tres medios utilizados. En los medios PDA y MMN el efecto de los diferentes ajustes de pH fue nulo. Respecto al pH, los valores entre 5,3 y 6,3, son los más efectivos, siendo 5,8 el valor con mayor producción de biomasa. En cuanto a los medios de cultivo, PDA y BAF fueron significativamente mejores que MMN. La cepa IF1616002 presentó un comportamiento similar al de la cepa anterior: logra la mayor biomasa en el medio BAF a pH 5,8, y BAF a 6,3; la menor en todos los tratamientos del medio MMN y la menor absoluta en MMN a pH 4,8. También se observa un nulo efecto de los diferentes ajustes de pH en los medios PDA y MMN. Respecto al factor pH, se la mayor biomasa se obtuvo para los ajustes entre 5,3 y 6,3. En cuanto a los medios de cultivo, BAF permite mayor producción de biomasa seca que los dos medios restantes (cuadro 6).

-Correlaciones entre Variables: En ambas cepas se observa una alta correlación entre CR y B (0,84 y 0,94) y entre VMC y B (0,83 y 0,95).

Cuadro 6. Efecto del medio de cultivo y pH sobre los valores medios (m) y desviaciones estándar (DE) de las variables crecimiento radial, velocidad media de crecimiento y producción de biomasa a nivel de cepas de *Suillus granulatus*.

Cepa	Factores			Interacción	Crecimiento radial (mm)			Velocidad media de crecimiento (mm/día)			Biomasa (mg)		
	Medio	pH	Medio*Ph		Medio	pH	Medio*Ph	Medio	pH	Medio*Ph	Medio	pH	Medio*Ph
					m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE
IF 937002 (n=75)	PDA (n=25)	4.8 (n=15)	4.8 (n=5)	23,05 ± 5,24 a	18,41 ± 2,86 c	18,59 2,74 d	0,76 ± 0,17 a	0,62 0,08 c	120,74 ± 33,82 a	69,92 ± 25,34 c	88,56 10,28 bcde	141,81 25,54 ab	
			5.3 (n=5)		26,91 4,04 ab	0,89 0,14 ab		131,44 41,81 abc					
			6.3 (n=5)		28,09 4,89 a	0,93 0,14 a		138,70 36,29 ab					
		5.3 (n=15)	6.8 (n=5)		23,07 ± 4,29 ab	21,63 4,68 abcd		0,78 ± 0,14 a		0,68 0,08 bc	100,31 ± 45,28 b		103,18 16,14 bcde
			4.8 (n=5)		17,32 1,23 d	0,58 0,07 c		41,42 10,96 e					
			5.3 (n=5)		19,64 1,34 cd	0,67 0,04 bc		49,58 16,95 de					
	MMN (n=25)	5.8 (n=15)	5.8 (n=5)	19,61 ± 2,28 b	24,32 ± 5,64 a	18,27 2,02 d	0,66 ± 0,09 b	0,82 ± 0,17 a	57,36 ± 22,20 b	120,79 ± 64,58 a	49,84 6,21 de	77,70 36,34 bcde	
			6.3 (n=5)	20,90 2,22 bcd	0,68 0,12 abc	77,70 36,34 bcde							
			6.8 (n=5)	20,84 ± 2,16 bc	23,12 3,05 abcd	0,75 0,07 abc		116,12 40,32 abc					
		6.3 (n=15)	4.8 (n=5)	21,88 ± 3,35 ab	19,30 4,13 d	0,73 ± 0,14 ab		0,66 0,15 bc		108,42 ± 43,46 b	68,24 7,84 cde		
			5.3 (n=5)	22,67 3,59 abcd	0,79 0,13 abc			79,78 21,24 bcde					
			5.8 (n=5)	22,45 ± 4,05 a	20,84 ± 2,16 bc			0,91 0,11 ab			109,54 27,61 abcd		
BAF (n=25)	6.8 (n=15)	6.8 (n=5)	20,84 ± 2,16 bc	26,60 3,68 abc	0,72 ± 0,08 ab		0,80 0,14 abc	115,36 ± 47,46 a	173,84 55,03 a				
		5.8 (n=5)	23,12 3,05 abcd	0,80 0,14 abc			116,12 40,32 abc						
		6.3 (n=5)	20,55 2,52 bcd	0,73 0,09 abc			97,54 36,76 bcde						
	4.8 (n=15)	4.8 (n=5)	15,97 ± 4,71 b	19,45 3,91 abcd		0,69 ± 0,09 a	0,54 ± 0,16 b		94,39 ± 16,50 b	75,64 14,44 cde			
		5.3 (n=5)	22,83 1,33 ab	0,77 0,03 ab			104,86 15,49 bc						
		5.8 (n=5)	20,69 2,53 ab	0,71 0,10 ab			94,90 11,83 bc						
IF1616002 (n=75)	5.3 (n=15)	6.3 (n=5)	17,87 ± 5,79 ab	18,74 2,82 bcd	0,61 ± 0,21 ab		0,64 0,09 abc	82,87 ± 40,17 a		96,98 13,93 bc			
		6.8 (n=5)	19,77 2,32 abc	0,68 0,07 ab			99,56 15,26 bc						
		4.8 (n=5)	10,56 0,53 f	0,35 0,02 ef			31,38 1,64 f						
	5.8 (n=15)	5.3 (n=5)	12,82 ± 2,32 b	10,49 0,70 f		0,41 ± 0,08 b	0,34 0,03 ef		38,8 ± 10,28 c	31,86 2,45 f			
		5.8 (n=5)	19,92 ± 4,20 a	15,17 2,22 cdef			0,46 0,09 cdef			40,12 13,15 ef			
		6.3 (n=5)	13,48 1,15 ef	0,45 0,04 def			46,94 7,63 def						
6.3 (n=15)	6.8 (n=5)	17,75 ± 4,08 ab	14,42 1,26 def	0,60 ± 0,16 ab	0,46 0,07 cdef		87,18 ± 38,59 a	43,68 12,24 ef					
	4.8 (n=5)	17,90 2,39 bcde	0,62 0,09 bcd		82,72 20,87 bcd								
	5.3 (n=5)	20,94 3,01 ab	0,71 0,11 ab		111,90 22,16 bc								
	5.8 (n=15)	5.8 (n=5)	17,90 ± 3,06 ab		23,90 1,26 a	0,71 ± 0,12 a		0,82 0,07 a	115,24 ± 31,36 a	151,28 6,87 a			
		6.3 (n=5)	17,90 ± 3,06 ab		21,02 3,41 ab			0,72 0,17 ab		117,62 40,71 ab			
		6.8 (n=5)	19,53 1,72 abc		0,67 0,05 ab			112,67 17,19 bc					

(*) Valores medios con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

-A Nivel de Especie

-Crecimiento Radial: Los mejores crecimientos fueron obtenidos en los medios BAF y PDA con pH entre 5,3 y 6,8, siendo los mayores absolutos los obtenidos con PDA a pH 5,3 y BAF a pH 5,8. No se observa efecto del factor pH en el medio MMN, el cual exhibe el menor crecimiento, particularmente con pH 4,8. Las mejores respuestas al pH, se presentan para el rango 5,3 a 6,3 (cuadro 7).

-Velocidad Media de Crecimiento: La mayor velocidad se obtuvo en medio BAF a pH 5,8, pero sin diferenciarse respecto a BAF a pH 5,3, 6,3 y 6,8, ni respecto a PDA con pH entre 5,3 y 6,8. En tanto que, el medio MMN, presentó los promedios de velocidades más bajas, particularmente con pH 4,8. Para el factor pH, los valores entre 5,3 y 6,8, presentaron los mejores desempeños, siendo los ajustes a 5,8 y 5,3 los que logran los valores absolutos más altos. Para el factor medio de cultivo, los mejores promedios fueron para PDA y BAF, diferenciándose significativamente del medio MMN (cuadro 7).

-Biomasa: La mayor biomasa se obtuvo en el medio BAF a pH 5,8, con diferencias significativas con el resto de los tratamientos. El medio MMN presenta los valores promedios más bajos y sin efecto de los valores de pH. Para el factor pH, valores entre 5,3 y 6,3 presentan buenos desempeños y no se diferencian estadísticamente entre sí, siendo 5,8 el pH que genera la mayor producción de biomasa. Respecto a los medios de cultivo, PDA Y BAF, presentaron los mayores montos de materia seca diferenciándose significativamente del medio MMN (cuadro 7).

-Correlaciones entre Variables: La correlación entre las variables CR y B y entre VMC y B son altas (0,94 y 0,95 respectivamente).

Cuadro 7. Efecto del medio de cultivo y pH sobre los valores medios (m) y desviaciones estándar (DE) de las variables crecimiento radial, velocidad media de crecimiento y producción de biomasa para *Suillus granulatus*.

Factores		Interacción	Crecimiento radial (mm)			Velocidad media de crecimiento (mm/día)			Biomasa (mg)		
Medio	pH	Medio*Ph	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE
PDA (n=50)	4.8 (n=10)	4.8 (n=10)	21,68 ± 4,41 a	17,19 ± 4,02 c	19,02 3,22 bcde	0,73 ± 0,14 a	0,58 ± 0,14 b	0,64 0,10 bcde	107,56 ± 29,51 a	66,58 c	82,10 13,64 cd
		5.3 (n=10)		24,87 3,56 a	24,87 3,56 a		0,83 0,12 ab	123,33 27,85 b			
		5.8 (n=10)		24,39 5,35 ab	24,39 5,35 ab		0,82 0,16 ab	116,80 34,36 bc			
	5.3 (n=30)	6.3 (n=10)		20,47 ± 5,66 ab	20,19 3,95 abcd		0,69 ± 0,20 a	0,67 0,13 abcd		91,59 ab	114,21 34,54 bc
		6.8 (n=10)		19,91 2,28 abcd	19,91 2,28 abcd		0,68 0,07 abcd	101,37 14,93 bc			
		4.8 (n=10)		13,94 3,67 e	13,94 3,67 e		0,46 0,13 e	36,40 9,09 e			
MMN (n=50)	5.8 (n=30)	5.3 (n=10)	16,22 ± 4,11 b	22,12 ± 5,37 a	15,07 4,93 de	0,54 ± 0,15 b	0,74 ± 0,19 a	0,50 0,18 de	48,08 ± 19,52 b	108,11 a	40,72 14,75 e
		5.8 (n=10)	16,72 2,59 cde	16,72 2,59 cde	0,55 0,11 de		44,98 10,97 de				
		6.3 (n=10)	17,19 4,25 cde	17,19 4,25 cde	0,56 0,15 cde		62,32 29,59 de				
	6.3 (n=30)	6.8 (n=10)	19,81 ± 4,23 abc	18,17 4,11 cde	0,66 ± 0,16 ab		0,61 0,17 cde	97,80 ab		55,96 16,17 de	
		4.8 (n=10)	18,60 3,27 cde	18,60 3,27 cde	0,64 0,12 bcde		81,25 19,91 cd				
		5.3 (n=10)	21,48 3,37 abc	21,48 3,37 abc	0,75 0,12 abc		110,72 23,63 bc				
BAF (n=50)	6.8 (n=30)	5.8 (n=10)	21,49 ± 3,67 a	19,37 ± 3,00 bc	25,25 2,96 a	0,74 ± 0,13 a	0,86 0,10 a		115,3 ± 39,81 a	87,48 b	162,56 38,84 a
		6.3 (n=10)	22,07 3,24 abc	22,07 3,24 abc	0,76 0,15 abc		116,87 38,21 bc				
	6.8 (n=10)	20,04 2,11 abcd	20,04 2,11 abcd	0,70 0,08 abcd	105,11 28,21 bc						
	6.8 (n=10)										

(*) Valores medios con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Análisis de *Suillus bellinii*

-A Nivel de Cepa

El análisis de los datos obtenidos para las cepas IF713001 y IF633001 evidencia interacciones con significativa estadística entre los factores pH y medio de cultivo sobre las variables respuesta CR, VMC y B (cuadro 8).

Cuadro 8. Significancia estadística del análisis de varianza (ANDEVA) para los valores medios obtenidos de las variables crecimiento radial (CR), velocidad media de crecimiento (VMC) y biomasa (B).

Factor	Cepa IF713001			Cepa IF 633001		
	CR (mm)	VMC (mm/día)	B (mg)	CR (mm)	VMC (mm/día)	B (mg)
Medio	0,2121	0,0182*	< 0,0001*	0,0043*	0,0082*	< 0,0001*
pH	0,0288*	0,0330*	0,0903	0,3518	0,2623	0,0001*
Medio x pH	0,0146*	0,0042*	0,0071*	0,0179*	0,0297*	0,0021*

* Efectos significativos (P ≤ 005)

-Crecimiento Radial: La cepa IF713001 presentó crecimientos bastante homogéneos para las distintas combinaciones de medio de cultivo y pH, solo se diferenciaron significativamente los valores más altos, correspondientes a BAF y PDA a pH 5,8 y MMN a pH 6,8, respecto del más bajo, obtenido con MMN a pH 5,3. No se observó efecto de los diferentes ajustes de pH en los medios BAF y PDA. Para el factor pH el mejor crecimiento se obtuvo con 5,8, pero sin diferencias respecto a 6,3 y 6,8.

Respecto a los medios de cultivo, no hubo diferencias significativas entre ellos.

En cuanto a la cepa IF633001, esta presentó su mayor crecimiento en medio MMN a pH 6,8, pero diferenciándose solo del crecimiento obtenido con BAF a pH 6,3 y 6,8 y con el medio PDA a pH 5,3 y 6,8.

Se observó al igual que la cepa anterior, un nulo efecto de los diferentes ajustes de pH sobre los medios BAF y PDA. Para el factor pH no hubo diferencias significativas entre los diferentes ajustes evaluados. En tanto que, para el factor medio de cultivo, el medio MMN presentó el mayor crecimiento promedio, con diferencias significativas con los medios PDA y BAF (cuadro 9).

-Velocidad Media de Crecimiento: Para la cepa IF713001 la mayor velocidad se obtuvo en el medio PDA a pH 5,8, aunque diferenciándose estadísticamente sólo con MMN a pH 5,3 y 4,8. Se observó, al igual que en la variable CR, un nulo efecto de los diferentes valores de pH sobre los medios BAF y PDA.

Para el factor pH, la mayor velocidad se obtuvo a pH 5,8, pero sin diferencias significativas con los promedios obtenidos para valores de 5,3, 6,3 y 6,8. En tanto que, para el factor medio de cultivo, el valor mayor se obtuvo en PDA, pero sin diferencias significativas con el medio BAF.

En relación a la cepa IF633001, el tratamiento con mejor desempeño fue MMN a pH 6,8 con diferencias significativas con los medios BAF para valores de pH de 6,3 y 6,8, y PDA para pH de 5,3 y 6,8. Se presentan nulos efectos de los distintos niveles de pH en los tres medios de cultivo.

Para el factor pH no hubo diferencias significativas entre los diferentes valores de pH. En tanto que, para el factor medio de cultivo, el medio MMN presentó la mayor velocidad promedio, con diferencias significativas con los medios BAF y PDA (cuadro 9).

-Biomasa: En la cepa IF713001 se observó una producción mayor de materia seca bajo el medio BAF a pH 5,3 y 5,8, presentando diferencias significativas con los promedios obtenidos en los medios PDA, MMN y BAF a pH 6,8. La menor producción de biomasa seca se obtiene en MMN. Se apreció un nulo efecto de los distintos niveles de pH en los medios PDA y MMN.

Para el factor pH no hubo diferencias significativas entre los diferentes ajustes analizados. En tanto que, para el factor medio de cultivo, se obtuvo la mayor cantidad de peso seco en el medio BAF con diferencias significativas con los medios MMN y PDA.

En cuanto a la cepa IF633001, esta presenta buenos desempeños en biomasa para los medios BAF y PDA con valores de pH entre 4,8 a 5,8. Se observa un crecimiento menor en todos los tratamientos que contemplaron el medio MMN, como también, un nulo efecto de los distintos niveles de pH en los medios PDA y MMN.

Para el factor pH, se obtuvo la mayor biomasa seca con 4,8 y 5,8, pero sin diferencias significativas con pH 5,3. Respecto a los medios de cultivo, la mayor biomasa seca se obtuvo con PDA y BAF (cuadro 9).

-Correlaciones entre variables: La correlación entre la biomasa seca y las variables de crecimiento exhibió un comportamiento muy diferente entre cepas. En IF713001 las correlaciones B-CR y B-VMC fueron de 0,50 y 0,44 respectivamente, en tanto que en IF633001 fueron de -0,02 y -0,03.

Cuadro 9. Efecto del medio de cultivo y pH sobre los valores medios (m) y desviaciones estándar (DE) de las variables crecimiento radial, velocidad media de crecimiento y producción de biomasa a nivel de cepas de *Suillus bellinii*.

Cepa	Factores			Crecimiento radial (mm)			Velocidad media de crecimiento (mm/día)			Biomasa (mg)		
	Medio	pH	Medio*Ph	Medio	pH	Medio*Ph	Medio	pH	Medio*Ph	Medio	pH	Medio*Ph
				m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE	m±DE
IF 713001 (n=75)	PDA (n=25)	4.8 (n=5)	4.8 (n=5)	18,18 ± 2,18	16,97 ± 2,25	17,36 1,55 ab	0,65 ± 0,07	0,59 ± 0,08	0,62 0,06 abc	80,49 ± 12,45	80,77 ± 33,65	78,06 7,99 def
			5.3 (n=5)			17,85 2,31 ab			0,65 0,08 abc			84,90 9,48 bcde
			5.8 (n=5)			19,71 1,96 a			0,70 0,08 a			85,85 10,80 bcd
		5.3 (n=15)	6.3 (n=5)		17,02 ± 2,74	18,38 2,05 ab		0,60 ± 0,10	0,66 0,06 abc		85,91 ± 37,87	80,84 13,90 cde
			6.8 (n=5)		17,59 2,89 ab	0,63 0,08 abc		72,83 18,05 def				
			4.8 (n=5)		15,05 0,90 ab	0,51 0,03 bc		48,92 5,86 ef				
	MMN (n=25)	5.8 (n=15)	5.3 (n=5)	17,13 ± 3,11	14,39 2,38 b	0,59 ± 0,10	0,49 0,07 c	53,98 ± 11,42	43,84 8,05 f			
			5.8 (n=5)	19,48 ± 3,10	18,60 4,13 ab	0,67 ± 0,10	0,64 0,13 abc	89,68 ± 32,70	58,84 13,26 def			
			6.3 (n=5)	18,08 1,64 ab	0,62 0,06 abc	53,38 4,08 def						
		6.3 (n=15)	6.8 (n=5)	17,89 ± 1,55	19,55 2,43 a	0,62 ± 0,05	0,68 0,08 ab	84,6 ± 30,41	64,90 12,30 def			
			4.8 (n=5)	18,51 2,60 ab	0,64 0,08 abc	115,34 33,07 abc						
			5.3 (n=5)	18,83 1,33 ab	0,65 0,05 abc	128,98 18,26 a						
BAF (n=25)	6.8 (n=15)	5.8 (n=5)	18,1 ± 2,48	17,67 ± 2,73	0,62 ± 0,08	0,67 0,11 ab	114,25 ± 27,10	124,36 27,18 a				
		6.3 (n=5)	17,20 0,74 ab	0,62 ± 0,09	0,59 0,02 abc	73,57 ± 16,93	119,58 16,16 ab					
		6.8 (n=5)	15,86 1,80 ab	0,55 0,07 abc	82,98 17,91 cde							
	4.8 (n=15)	5.3 (n=5)	20,07 ± 2,31	19,58 2,52 ab	0,65 ± 0,10	0,66 0,09 ab	111,56 ± 35,31	111,56 4,51 abcd				
		5.8 (n=5)	18,53 4,05 b	0,59 0,12 b	116,76 16,00 abc							
		6.3 (n=5)	22,01 2,81 ab	0,76 0,10 ab	124,76 16,67 abc							
IF 633001 (n=75)	PDA (n=25)	5.3 (n=15)	6.3 (n=5)	19,46 ± 2,81	19,62 ± 4,02	19,02 1,36 ab	0,64 ± 0,14	0,64 0,05 ab	107,12 ± 19,21	108,18 ± 33,92	88,20 8,11 bcde	
			4.8 (n=5)	18,15 1,83 b	0,60 0,06 b	94,70 20,82 bcde						
			19,48 1,46 ab	0,66 0,06 ab	73,32 7,92 de							
	MMN (n=25)	5.8 (n=15)	5.3 (n=5)	21,84 ± 4,50	21,47 ± 3,81	20,58 5,91 ab	0,74 ± 0,17	0,73 ± 0,14	0,68 0,22 ab	76,35 ± 14,31	112,01 ± 31,31	68,82 16,99 e
			5.8 (n=5)	22,58 5,02 ab	0,76 0,20 ab	84,28 18,90 cde						
			6.3 (n=5)	20,62 3,37 ab	0,69 0,14 ab	71,12 10,81 de						
BAF (n=25)	6.3 (n=15)	6.8 (n=5)	19,06 ± 2,61	25,92 3,94 a	0,64 ± 0,10	0,88 0,15 a	84,27 ± 17,74	84,22 11,40 cde				
		4.8 (n=5)	21,14 2,83 ab	0,71 0,10 ab	149,50 25,56 a							
		5.3 (n=5)	19,75 1,62 ab	0,65 0,05 ab	139,38 15,65 a							
	6.8 (n=15)	5.8 (n=5)	19,96 ± 5,23	19,83 3,52 ab	0,67 ± 0,19	0,67 0,11 ab	89,53 ± 17,55	126,98 36,77 ab				
		6.3 (n=5)	17,54 2,14 b	0,60 0,08 b	93,48 24,03 bcde							
		6.8 (n=5)	15,80 2,56 b	0,54 0,09 b	89,68 21,13 bcde							

(*) Valores medios con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

-A Nivel de Especie

-Crecimiento Radial: No se evidenció diferencias significativas entre los niveles de pH dentro de los medios BAF y PDA, sólo en el medio MMN donde el pH 6,8 fue diferente a los demás. Tampoco se detectó diferencia entre los medios de cultivo (cuadro 10).

-Velocidad Media de Crecimiento: Presenta un comportamiento similar a la variable CR, no existen diferencias significativas entre los niveles de pH que se encontraban interactuando dentro de los medios BAF y PDA, mostrando sólo diferencias dentro del medio MMN, con el promedio obtenido a 6.8. En relación al medio MMN a pH 6,8. este presentó diferencias significativas con los promedios obtenidos para pH 4,8 y 5,3 de este mismo medio, como también, con los medios PDA a pH 5,3 y BAF a pH 6,3 y 6,8. Respecto al factor pH, la mayor velocidad de crecimiento fue a 5,8 y la menor a 5,3, ambas estadísticamente diferentes. No se obtuvieron diferencias significativas entre los 3 medios de crecimiento (cuadro 10).

-Biomasa: La mayor producción de biomasa seca se obtuvo en el medio BAF con pH 5,3 y 4,8, pero sin diferencias significativas respecto a BAF con pH 5,8 y 6,3, ni con PDA a pH 5,8. No se detectó diferencias significativas asociadas a los niveles de pH de los medios PDA y MMN, además de observar un bajo desempeño en peso seco para este último medio de cultivo.

Respecto al factor pH, el ajuste a 5,8 fue el que produjo el mayor valor en peso seco, pero sin diferencias significativas con los ajustes a 5,3 y 4,8. En cuanto al factor medio de cultivo, BAF genera significativamente más biomasa seca que los dos medios restantes (cuadro 10).

-Correlaciones entre Variables: La producción de biomasa presenta una débil correlación con el crecimiento radial (0,14) y con la velocidad media de crecimiento (0,11).

Cuadro 10. Efecto del medio de cultivo y pH sobre los valores medios (m) y desviaciones estándar (DE) de las variables crecimiento radial, velocidad media de crecimiento y producción de biomasa para *Suillus bellinii*.

Factores			Crecimiento radial (mm)			Velocidad media de crecimiento (mm/día)			Biomasa (mg)				
Medio	pH	Medio*Ph	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE	Medio m±DE	pH m±DE	Medio*Ph m±DE		
PDA (n=50)	4.8 (n=30)	4.8 (n=10)	18,82 ± 2,57 a	18,52 ± a	18,47 2,29 abc	0,65 ± 0,09 a	0,63 ± 0,09 ab	0,64 0,08 abc	93,8 ± 20,92 b	96,12 ± 37,31 abc	94,81 18,68 bcde		
		5.3 (n=10)		18,19 3,13 abc	0,62 0,10 bc			100,62 20,70 bcde					
		5.8 (n=10)		20,86 2,59 ab	0,73 0,09 ab			105,30 24,42 abcd					
	5.3 (n=30)	6.3 (n=10)		18,32 ± 3,63 a	18,70 1,68 abc			0,62 ± 0,12 b			0,65 0,06 abc	97,04 ± 37,10 ab	84,52 11,41 cdef
		6.8 (n=10)		17,87 2,30 bc	0,62 0,07 abc			83,76 21,69 cdef					
		4.8 (n=10)		17,26 2,60 bc	0,59 0,09 bc			61,12 14,44 f					
MMN (n=50)	5.8 (n=30)	5.3 (n=10)	19,49 ± 4,50 a	20,47 ± a	17,49 5,36 bc	0,66 ± 0,16 a	0,7 ± 0,12 a	0,58 0,18 bc	65,16 ± 17,08 c	100,84 ± 33,44 a	56,33 18,18 f		
		5.8 (n=10)		20,59 4,81 ab	0,70 0,17 abc			71,56 20,41 ef					
		6.3 (n=10)		19,35 2,84 abc	0,66 0,11 abc			62,25 12,11 f					
	6.3 (n=30)	6.8 (n=10)		18,47 ± 2,19 a	22,74 4,56 a			0,63 ± 0,08 ab			0,78 0,16 a	74,56 15,12 def	
		4.8 (n=10)		19,82 2,91 abc	0,67 0,09 abc			84,43 ± 24,46 bc			132,42 33,18 a		
		5.3 (n=10)		19,29 1,48 abc	0,65 0,05 abc			134,18 16,94 a					
BAF (n=50)	6.8 (n=30)	5.8 (n=10)	18,46 ± 2,79 a	18,81 ± a	19,97 3,24 abc	0,63 ± 0,09 a	0,65 ± 0,15 ab	0,67 0,11 abc	117,03 ± 30,54 a	81,55 ± 18,79 c	125,67 30,51 ab		
		5.8 (n=10)		17,37 1,52 bc	0,59 0,06 bc			106,53 23,71 abc					
		6.8 (n=10)		15,83 2,09 c	0,54 0,08 c			86,33 18,80 cdef					

(*) Valores medios con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

DISCUSIÓN

El efecto del medio de cultivo y del pH sobre la respuesta en crecimiento y producción de biomasa de las cepas y especies de hongos evaluadas indican variaciones en las estrategias mediante la cual estos organismos enfrentan los cambios en su medio de crecimiento. En algunos casos muestran respuestas distintas entre cepas y entre especies, influenciadas por las interacciones que se presentan entre los factores medioambientales y la variabilidad genética que presenta cada especie. Por lo mismo, los resultados se deben considerar en forma particular para cada cepa evaluada.

Se han realizado estudios para evaluar parámetros medioambientales con diferentes cepas de especies micorrícicas, con resultados muy diversos debido principalmente a la variabilidad genética que presentan dichos microorganismos y a las condiciones de sitio donde se desarrollan. Esto es reafirmado por los investigadores Islam & Ohga (2013), quienes indican que para llegar a producir inoculantes fúngicos a gran escala, es necesario definir la composición óptima del medio de cultivo para cada hongo tomando en cuenta las diferentes cepas sobre una gran variación de condiciones medioambientales.

Con respecto al crecimiento radial de *S. granulatus* en diferentes medios de cultivo y niveles de pH, Murrieta-Hernández *et al.* (2014) señalan que PDA a pH 5,8 fue el mejor tratamiento, coincidiendo con lo observado en este estudio para las dos cepas evaluadas. Los autores también obtienen un bajo crecimiento en el medio MMN en relación a BAF y PDA, aspecto que también coincide con lo observado en el presente estudio y en las investigaciones efectuadas por Torres & Honrubia (1991).

Gonzalez *et al.* (2015) trabajando con diferentes medios de cultivos y valores de pH en *Suillus luteus*, mencionan al medio BAF como uno de los que promueve el mayor crecimiento a pH de 4,8 y 5,8, lo que concuerda parcialmente con los resultados de este estudio. En efecto, la cepa IF732002 obtuvo los mayores crecimientos en este medio con pH 5,8, mientras que para la cepa IF1618002 fue a pH 6,3.

Sianard *et al.* (2010) trabajando con diferentes ajustes de pH en medio BAF, concluyen que para *S. bellinii* el mayor crecimiento se produjo a pH 4,6 y que para *S. granulatus* fue a 5,6. Estos antecedentes concuerdan en gran medida con lo obtenido en una de las cepas de *S. bellinii* (IF633001), y con lo observado en ambas cepas de *S. granulatus*, que lograron el mayor crecimiento en un pH muy similar (5,8). En cambio, Murrieta-Hernández *et al.* (2014) señala que los dos valores de pH que evaluaron en *S. granulatus* (4,8 y 5,8), no indujeron diferencias de crecimiento, lo que difiere con lo obtenido en ese ensayo. Además, estos investigadores, mencionan que el medio PDA produjo el mayor crecimiento miceliar, lo que es similar a lo observado con la cepa IF937002, aunque esta presentó también un crecimiento parecido en medio BAF; en tanto que para la cepa IF1616002 fue sólo en el medio BAF. Otros estudios realizados por Santelices *et al.* (2012) utilizando valores de pH de 5,0, 5,8 y 6,5 en los medios MMN y MEAa2% (agar con extracto de Malta al 2%), hacen también referencia a que no obtuvieron diferencias de crecimiento miceliar que sean significativas a nivel de pH y medio de cultivo

para *S. luteus*, lo que es bastante coincidente con lo obtenido en medio MMN para esta especie. García-Rodríguez *et al.* (2017), estudiando los efectos del pH a 4,8, 5,3, 5,8, 6,3 y 6,8 sobre el crecimiento radial de cepas de *S. luteus* y *S. granulatus* en medio MMN, mencionan comportamientos muy parecidos entre ellas, lo que coincide con lo observado en este estudio a excepción de la cepa de *S. luteus* IF 732002 que presenta diferencias significativas entre el medio MMN a 6,8 y MMN a 4,8. Trabajos realizados por Lazarevic *et al.* (2016) en relación a los efectos del pH sobre el crecimiento micelial de *S. granulatus*, utilizando el medio nutritivo MMN, determinaron que el mayor crecimiento se obtenía con rangos de pH entre 4,0 y 5,2, lo que no concuerda con lo observado en este estudio, cuyos resultados señalan mejores crecimientos para el medio MMN con pH de 6,8 y 5,8, para las cepas IF937002 y IF1616002, respectivamente. Las dificultades de encontrar un patrón de comportamiento fueron mencionadas por García-Rodríguez *et al.* (2017) al analizar la variable CR en las especies *S. granulatus* y *S. luteus*. Además, factores como el pH, pueden determinar biológicamente el tipo de organismo capaz de desarrollarse en un sustrato, debido a su influencia significativa en la disponibilidad de nutrientes (Pereira *et al.*, 2007).

En lo relativo a la velocidad media de crecimiento en medio BAF, con pH ajustado a 4,6, 5,6, 6,6 y 7,6, Sianard *et al.* (2010) indican que *S. bellinii* presentó su máxima velocidad a pH 4,6, y *S. granulatus* a pH 6,6. Estos resultados son parcialmente coincidentes con los obtenidos en este estudio en medio BAF para las cepas de *S. bellinii* IF633001 y IF713001, las que lograron la mayor velocidad de crecimiento en BAF con pH 4,8 y 5,8, respectivamente, mientras que para *S. granulatus* el máximo valor obtenido para las cepas IF1616002 y IF937002 fue con pH 5,8.

Murrieta-Hernández, *et al.* (2014) sugieren el medio BAF como medio de producción masiva de micelio para *S. granulatus*, debido a la mayor velocidad de crecimiento que se consigue en dicho medio. Pereira *et al.* (2007) también obtienen la mayor velocidad en BAF con pH 4,8, y esta decrece a medida que disminuye la acidez del medio, resultado distinto a lo obtenido para las cepas evaluadas en el presente estudio, las que obtuvieron su mayor valor entre pH 5,8 y 6,3 en el mismo medio BAF, y valores aún mayores para pH 5,8 en medio PDA y 6,8 en MMN para las cepas IF1618002 y IF732002, respectivamente.

En relación a la producción de biomasa seca, diversos investigadores coinciden en que los medios PDA y BAF resultaron ser significativamente más efectivos para la especie *S. luteus* (Fernández-Miranda, 2008; Murrieta-Hernández, *et al.*, 2014; Gonzalez *et al.*, 2015); por el contrario, mencionan al medio MMN como el que produce los menores rendimientos en biomasa. Sobre este particular Molina y Palmer (1982), afirman que el medio de cultivo más adecuado para un hongo ectomicorrícico, es el que le aporte los requerimientos nutritivos que obtienen de su hospedante al establecer la simbiosis, lo cual marcaría el éxito o fracaso en el cultivo de estas especies bajo condiciones controladas. Bajo esta premisa, en el contexto de los resultados obtenidos y buscando una metodología que permita generar la mayor cantidad de biomasa, se puede indicar al medio BAF como el mejor medio para su utilización en la producción micelial, debido a su buen desempeño en generar la mayor cantidad de materia seca, para las seis cepas evaluadas. Se agrega para este uso el medio PDA, de menor costo, y que en 4 de las seis cepas evaluadas mostro rendimientos similares y sin diferencias significativas con el medio BAF.

La mayor producción de biomasa seca para *Suillus luteus* se obtuvo para pH igual o mayor a 5,3, con 154,54 mg a pH 5,8 en medio BAF. En *S. granulatus* su mejor producción se obtuvo entre PH 5,3 y 6,3, con 173,84 mg a pH 5,8 en medio BAF. En *S. bellinii* la mayor producción de biomasa seca se logró a pH entre 4,8 y 5,8, aunque también se alcanzó buen rendimiento a pH 6,3, como es el caso de la cepa IF 71300; en esta última especie su valor máximo alcanzó 149,50 mg a pH 4,8 en medio BAF.

García-Rodríguez *et al.* (2017) estudiaron el efecto de diferentes valores de pH sobre la producción de biomasa, determinando que no existían diferencias significativas entre los tratamientos para cepas de *S. luteus* y *S. granulatus*; esto coincide con lo obtenido en este estudio con la cepa IF1618002 de *S. luteus*, sin embargo, los resultados obtenidos también muestran un efecto del pH en la producción de materia seca dependiendo de la cepa evaluada y del medio que se utilice para la evaluación. Es así como la cepa IF732002 de *S. luteus*, exhibió un crecimiento menor a pH 4,8 y significativamente diferente a los otros niveles de pH dentro del medio BAF, no así en los medios MMN y PDA. En las dos cepas de *S. granulatus*, se observó una menor producción de biomasa a pH 4,8 en todos los medios utilizados y obteniendo los mayores montos a pH 5,8 en medio BAF. Por otro lado, existe otros rangos de pH en los

cuales se ha obtenido un aumento de biomasa, como lo han observado Sánchez *et al.* (2001) para *S. granulatus* y *S. luteus* a un pH de 8,5. De acuerdo a lo observado en este estudio y lo obtenido por Hung & Trappe (1983), los rangos de pH que generan un buen crecimiento varían drásticamente entre especies como entre cepas dentro de las especies.

Respecto a las relaciones entre las variables de crecimiento (CR, VCM) y la biomasa seca (B), se obtuvo resultados muy variados. Una alta correlación fue observada para las cepas de *Suillus granulatus* entre la variable CR y B, pero no así para *S. luteus*, que presentó una baja correlación para sus dos cepas estudiadas. En *Suillus bellinii* esta correlación fue moderada para la cepa IF713001 y nula para la cepa IF633001. Se concluye que el crecimiento radial no es buen indicador de la producción de biomasa seca para las especies *S. luteus* y *S. bellinii*, cuyas correlaciones son bajas a nulas entre la variable CR y B. En *S. granulatus*, a pesar de obtener una alta correlación no se puede asegurar este mismo comportamiento para todas las cepas de esta especie. Un indicador confiable del comportamiento de una determinada cepa sería la producción de biomasa, la cual no necesariamente puede estimarse a partir del crecimiento radial. Esto también ha sido mencionado por Santiago-Martínez *et al.* (1995), los cuales señalan que los mayores crecimientos en diámetro de la cepa bajo un cultivo *in vitro*, no siempre corresponden con la mayor producción de biomasa, aspecto que es de importancia debido al frecuente empleo de este parámetro como único elemento para evaluar el crecimiento de la cepa.

CONCLUSIONES

El desarrollo de los hongos micorrícicos depende de diversos factores medio ambientales. Si se analiza a nivel de especie, y más aun a nivel de cepa o ecotipo, estos poseen sus propias limitaciones frente a determinadas condiciones ambientales (Sianard, *et al.*, 2010). Por lo tanto, el estudio de factores ambientales como el nivel de pH y los medios de cultivos para la masificación de hongos y/o cepas, son necesarios para poder conocerlos, pues sus comportamientos difieren al interactuar con cada uno de estos parámetros (Honrubia *et al.*, 1992; Pereira, 2002; Vázquez- García *et al.*, 2002). Conocer las relaciones entre tales parámetros y las respuestas de cada hongo o cepa en particular, permitirá perfeccionar la producción de micelios de hongos ectomicorrícicos.

Si bien bajo ciertas condiciones de cultivo algunas cepas presentaron mejor rendimiento que otras en términos de crecimiento radial, velocidad de crecimiento y producción de biomasa, su selección final para ser utilizadas en actividades de micorrización de plantas dependerá de su desempeño en vivero y su comportamiento en campo. Hung y Trappe (1983), citando a varios investigadores, afirman que el efecto del pH sobre el crecimiento fúngico *in vitro*, debe ser interpretado con precaución, debido a que el desempeño del hongo puede ser afectado por múltiples factores que pueden hacer variar los resultados, como la duración del experimento, las fuentes de nitrógeno, la inclusión de sales de hierro antes o después del autoclavado del medio, y otros. Estos mismos autores, señalan que, en igualdad de condiciones, un aislado que crezca razonablemente bien en un amplio rango de valores de pH sería preferible para trabajos de masificación e inoculación en vivero a uno que crezca bien solo en un rango restringido.

De acuerdo a comportamiento observando en las cepas y especies evaluadas, se plantea la necesidad de recolectar y testear gran cantidad de material fúngico, que recoja la máxima variabilidad bajo diversos ambientes, con el fin de seleccionar cepas específicas para sitios específicos, ajustando en forma paralela los protocolos que permitan desarrollar una producción operativa de inoculantes a gran escala para satisfacer necesidades de micorrización de viveros. Esta necesidad de selección se debe a la variación genética de las especies fúngicas, la que debe ser considerada al momento de seleccionar especies y cepas, para la elaboración de inoculantes de plantas de vivero (Pera *et al.*, 1998).

El pH juega un papel importante en el crecimiento de hongos ectomicorrícicos, aspecto que fue corroborado en este trabajo, donde se observó cepas más acidófilas que otras. En otros casos este factor no presenta efecto significativo dentro de cada medio de cultivo, pero si en la interacción con el mismo, lo que podría deberse a la influencia del pH sobre la disponibilidad de algunos nutrientes en el medio utilizado. En efecto, Pereira *et al.* (2007) mencionan que el pH tiene una influencia significativa en la disponibilidad de nutrientes, pudiendo determinar biológicamente el tipo de organismo capaz de desarrollarse en un suelo o sustrato. Por su parte, Willenborg *et al.* (1990), mencionó que los hongos

ectomicorrícicos tienen, en general, una naturaleza acidófila cuando se cultivan en condiciones de cultivo puro.

Los resultados obtenidos sugieren que los medios BAF y PDA, y valores de pH cercanos a 5,8, serían combinaciones adecuadas para la masificación micelar orientada a la producción de inoculantes para viveros forestales. Sin embargo, no se debe descartar el factor de la variación genética, que podría hacer necesario el uso de uno u otro medio de cultivo y distintos niveles de pH, para cada una de las especies y cepas a masificar.

REFERENCIAS

- Blanco, D., Fajardo, J., Verde, A. & Rodríguez, C. (2012). Etnomicología de los hongos del género *Suillus*, una visión global. Bol. Soc. Micol. Madrid, 36. Pp: 175 - 186.
- Brundrett, M. & Cairney, J. (2002). Ectomycorrhizas in plant communities. En: Microorganisms in plant conservation and biodiversity. Springer, Dordrecht. Pp: 105-150. https://doi.org/10.1007/0-306-48099-9_5
- Bruns, T.D., Tan, J., Bidartando, M., Szaro, T.M. & Redecker, D. (2002). Survival of *Suillus pungens* and *Amanita francheti* ectomycorrhizal genets was rare or absent after a stand-replacing fire. New Phytologist, 155. Pp: 517-523. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00468.x>
- Chung, P. (2020). Captura, aislamiento y evaluación del crecimiento de material fúngico de la región de Ñuble para su incorporación al Banco de Hongos Comestibles del Instituto Forestal. Ciencia e Investigación Forestal INFOR Chile. Volumen 26 N° 3 Diciembre 2020 pp: 65-92 <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.538>
- Fernández-Miranda, E., Alvarado, P., Alonso-Graña, M., Majada, J. & Casares, A. (2008). Influencia de las condiciones culturales en el crecimiento de diferentes hongos ectomicorrícicos. Actas de la IV Reunión sobre Repoblaciones Forestales. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For., 28. Pp: 207-211.
- García-Rodríguez, J., Pérez-Moreno, J., Ríos-Leal, D., Sáez-Delgado, P., Atala-Bianchi, C., Sánchez-Olate, M. & Pereira-Cancino, G. (2017). Crecimiento *in vitro* de hongos ectomicorrícicos asociados con plantaciones de *Pinus radiata* en Chile. Revista Fitotec. Mexico., 40(4): 415-423. <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.4.415-423>
- García-Rodríguez J., Pérez-Moreno, J., Aldrete, A., Cetina-Alcalá, V. & Vaquera-Huerta, H. (2006). Caracterización del hongo silvestre ectomicorrícico *Pisolithus tinctorius* (Pers.) Cooke *et* Couch en cultivo y en simbiosis con eucalipto y pino. Agrociencia 40:665-676.
- González, M., Quiroz, I., Travieso, R., Chung, P. & García, E. (2015). Determinación de medios de cultivo y pH para la masificación *in vitro* de cepas de *Suillus luteus* Aubl. asociadas a *Pinus radiata* D. Don y *Scleroderma citrinum* Pers. asociadas a *Eucalyptus globulus* Labill. de la región del Biobío, Chile. Revista Árvore, 39. Pp: 105-113. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000100010>
- Honrubia, M., Torres, P., Díaz, G. & Cano, A. (1992). Manual para micorrizar plantas en viveros forestales. Madrid. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
- Hung, L. & Trappe, J. (1983). Growth variation between and within species of ectomycorrhizal fungi in response to pH *in vitro*. Mycologia 75:234-241. <https://doi.org/10.1080/00275514.1983.12021660>
- INFOR. (2020). Estadísticas forestales. En: <https://wef.infor.cl/>. Consulta: 10 marzo, 2021
- Islam, F. & Ohga, S. (2013). Effects of media formulation on the growth and morphology of ectomycorrhizae and their association with host plant. ISRN Agronomy. Vol. 2013, Article ID 317903, 12 p. Hindawi Publishing Corporation. <https://doi.org/10.1155/2013/317903>
- Lazarevic J., Stojičić, D. & Keča, N. (2016). Effects of temperature, pH, carbon and nitrogen sources on growth of *in vitro* cultures of ectomycorrhizal isolates from *Pinus heldreichii* forest. Forest Systems, 25. Pp: 1-10. <https://doi.org/10.5424/fs/2016251-07036>
- Marx, D.H. (1969). The influence of ectotrophic fungi on the resistance of pine roots to pathogenic infections. I. Antagonism of mycorrhizal fungi to root pathogenic fungi and soil bacteria. Phytopathology, v.59, p.153-163.
- Molina, R. & Palmer, J. (1982). Isolation, maintenance and pure culture manipulation of ectomycorrhizal fungi. En: Methods and Principles of Mycorrhizal Research. N.C. Schenck (Ed) American Phytopathological Soc. St. Paul.
- Montgomery, D. (1984). Design and Analysis of Experiments. John Wiley & Sons. New York. 649 p.
- Moser, M. (1960). Die Gattung Phlegmacium. Die Pilze Mitteleuropas 4. J. Bad Heilbrunn.

- Murrieta-Hernández, D.M., Noa-Carrazana, J.C., Mata-Rosas, M., Pineda-López, M del R., Zulueta-Rodríguez, R. & Flores-Estévez, N. (2014). Efecto del medio de cultivo en el desarrollo de *Suillus granulatus* (L.) Roussel y *S. brevipes* (Pk.) Kuntze. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 20. Pp: 101-107. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.06.021>
- Pera, J., Álvarez, L. & Parlade, J. (1998). Eficacia del inóculo miceliar de 17 especies de hongos ectomicorrícicos para la micorrización controlada de: *Pinus pinaster*, *Pinus radiata* y *Pseudotsuga menziesii*, en contenedor. Invest. Agr.: Sist. Rec. For., 7(1 y 2): 139-153.
- Pereira, G., Herrera, J., Machuca, A. & Sánchez, M. (2007). Efecto del pH sobre el crecimiento *in vitro* de hongos ectomicorrícicos recolectados de plantaciones de *Pinus radiata*. Bosque 28. Pp: 215-219. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002007000300005>
- Pereira, G. (2002). Micorrizas, suelos degradados y silvicultura de precisión. Chile Forestal. 276. Pp: 27- 29.
- Sánchez, F., Honrubia, M. & Torres, P. (2001) Effects of pH, water stress and temperature on *in vitro* cultures of ectomycorrhizal fungi from Mediterranean forests. Cryptogamie Mycologie, 22. Pp: 243-258. [https://doi.org/10.1016/S0181-1584\(01\)01076-4](https://doi.org/10.1016/S0181-1584(01)01076-4)
- Santelices, R., Espinoza, S., Brunel, N. & Palfner, G. (2012). Effect of the geographical origin, culture media, and pH on the growth dynamic of the edible ectomycorrhizal mushroom *Suillus luteus*. Cien. Inv. Agr., 39(2): 369-376. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202012000200013>
- Santiago-Martínez, G., Varela, L., Estrada-Torres, A. & Cuaxilo, V. (1995). Efecto de seis medios de cultivo sobre el crecimiento de tres cepas de *Pisolithus tinctorius*. Revista Mexicana de Micología, 11. Pp: 57-68. <https://dx.doi.org/10.33885/sf.1995.3.829>
- Santiago-Martínez G., Estrada-Torres, A., Varela, L. & Herrera, T. (2003). Crecimiento en siete medios nutritivos y síntesis *in vitro* de una cepa de *Laccaria bicolor*. Agrociencia, 37(6): 575-584.
- Sianard, F., Pangou, S. & Mountanda, A. (2010). Influencia del pH en el desarrollo *in vitro* de cinco especies de hongos ectomicorrícicos. Centro Agrícola, 37(1): 23-28.
- Torres, P. & Honrubia, M. (1991). Dinámica de crecimiento y caracterización de algunos hongos ectomicorrícicos en cultivo. Cryptogamie Mycologie, 12. Pp: 183-192.
- Vázquez-García, A., Santiago-Martínez, G & Estrada-Torres, A. (2002). Influencia del pH en el crecimiento de quince cepas de hongos ectomicorrizógenos. Anales del Instituto de Biología. Serie Botánica, 73. Pp: 1-15.
- Willenborg A., Schmitz, D. & Lelley, J. (1990) Effects of environmental stress factors on ectomycorrhizal fungi *in vitro*. Canadian Journal of Botany, 68. Pp: 1741-1746. <http://doi.org/10.1139/b90-224>



ARTÍCULO

Importancia del sector forestal en la contabilidad de gases de efecto invernadero (GEI) del país.

Yasna Rojas^{1*}, Carlos Büchner¹, Marjorie Martin¹, Sabine Müller-Using¹ y Carlos Bahamondez¹

¹ Instituto Forestal, Sede Los Ríos. yasna.rojas@infor.cl

*Autor de correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.558>

Recibido: 21.09.2021; Aceptado 17.12.2021

RESUMEN

El sector forestal a través del bosque nativo, las plantaciones y los productos de madera recolectada juega un rol muy importante en el país, contribuye a la mitigación del cambio climático y es el principal sumidero de carbono. En el año 2018, contribuyó al balance de gases de efecto invernadero disminuyendo en 57% las emisiones del país, con una absorción neta de -68.878,3 kt CO₂ eq. Desde 1990 hasta 2018 el sector ha aumentado las absorciones de carbono, en directa relación con el aumento de la superficie de bosques (forestación) y la incorporación de bosque nativo bajo manejo. En el caso del bosque nativo, se observa que la mayor contribución proviene de los bosques de renovales y de las áreas de conservación, mientras que en las plantaciones, la especie *Pinus radiata* es la que domina con una mayor absorción dada la mayor superficie respecto a otras especies exóticas. Las emisiones de GEI se relacionan directamente con el aumento de las cosechas de trozas y el consumo de leña, mientras que los incendios juegan un rol fundamental en el incremento de emisiones en años puntuales y se observa un aumento de la frecuencia de estos en los últimos años. El sector forestal tiene un potencial para aumentar su capacidad de sumidero de carbono, sin embargo, es necesario considerar todas las variables que afectan las absorciones y las emisiones que afectan al sector.

Palabras clave: Cambio climático, bosques, GEI.

SUMMARY

Through the native forest, plantations and harvested wood products the forestry sector plays a very important role in the country, contributes to the mitigation of climate change and is the main carbon sink. In 2018, it contributed to the greenhouse gas balance by reducing the country's emissions by 57%, with a net absorption of -68,878.3 kt CO₂ eq. From 1990 to 2018, the sector has increased carbon removals, in direct relation to the increase in the area of forests (afforestation) and the incorporation of native forests under management. In the case of the native forest, it is observed that the greatest contribution comes from the second-growth forests and from the conservation areas, while in the plantations, the *Pinus radiata* species is the one that dominates with a greater absorption given the greater surface area with respect to other exotic species. GHG emissions are directly related to the increase in log harvests and the consumption of firewood, while fires play a fundamental role in the increase of emissions in specific years and an increase in their frequency is observed in recent years. The forestry sector has the potential to increase its carbon sink capacity, however, it is necessary to consider all the variables that affect the removals and emissions that affect the sector.

Keywords: Climatic change, forests, GHG.

INTRODUCCIÓN

Los bosques naturales primarios y secundarios, así como las plantaciones forestales son importantes sumideros de carbono, fijando el carbono en su biomasa hasta el momento de su cosecha y persistiendo el carbono capturado en la madera durante otro período de tiempo hasta su total degradación. En los ecosistemas forestales, los árboles son el componente más importante de almacenamiento de biomasa y de carbono. El contenido de carbono que se encuentra en los ecosistemas forestales es el resultado de la capacidad de almacenamiento que estos tienen mediante el proceso de fotosíntesis. Las emisiones que se producen en este sector corresponden a las cortas y extracciones de biomasa del bosque y también a eventos que alteran el desarrollo del bosque como los incendios forestales o plagas.

A partir de los acuerdos de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) los países llevan la contabilidad de sus emisiones a través de los inventarios de gases de efecto invernadero (GEI). Para ello se consideran en la contabilidad a cinco sectores: (i) Energía; (ii)

Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU por sus siglas en inglés); (iii) Agricultura; (iv) Uso de la Tierra, Cambio de uso de la tierra y Silvicultura (UTCUTS); y (v) Residuos. En el año 2018, el balance de GEI del país contabilizó 48.321 kt CO₂ eq, este balance se produce al totalizar 112.312,6 kt CO₂ eq de emisiones y -63.991,9 kt CO₂ eq de absorciones, estas últimas provienen exclusivamente del sector UTCUTS (MMA, 2021).

Por otra parte, el sector UTCUTS considera seis categorías de tierras de acuerdo a las Directrices del IPCC de 2006. (i) tierras forestales; (ii) tierras de cultivo; (iii) pastizales, (iv) humedales; (v) asentamientos, y (vi) otras tierras, además del depósito de carbono en productos de madera. Dentro del sector UTCUTS, las tierras forestales y los productos de madera en el 2018 concentraron una absorción neta de -61.344,3 kt CO₂eq y -7.533,7 kt CO₂eq respectivamente, convirtiéndolos en los principales sumideros de carbono del país. Chile cuenta con un importante recurso forestal al año 2018, comprendiendo 16,2 millones de hectáreas de bosque nativo (CONAF para la actualización del inventario de GEI) y 2,3 millones de hectáreas de plantaciones forestales (INFOR, 2019). El presente artículo tiene como objetivo describir el rol que cumple el sector forestal en la contabilidad de gases de efecto invernadero del país e interpretar esta información en el contexto del sector forestal y maderero entre 1990 y 2018.

MATERIAL Y MÉTODO

En este documento se trabaja con la información proveniente del inventario de gases de efecto invernadero del sector UTCUTS, en conjunto con información estadística del sector, proveniente de los anuarios forestales que publica INFOR. Información que se ha procesado y analizado para facilitar la comprensión del público en general respecto de los distintos elementos que participan en el cálculo de la captura de carbono del sector forestal.

Conceptos

En la contabilidad de gases de efecto invernadero (GEI) solo se consideran las emisiones y absorciones antrópicas, eso significa que las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero de los inventarios nacionales son el resultado de las actividades humanas.

Se entiende como depósito de carbono, un componente del sistema climático donde el carbono está almacenado. La biomasa forestal, los productos de madera, el suelo y la atmósfera son ejemplos de depósitos de carbono.

Para el sector Agricultura y UTCUTS, las emisiones antrópicas y absorciones por sumideros de gases de efecto invernadero se definen como aquellas que se producen en “tierras gestionadas”. La tierra gestionada se define como aquella en la que ha habido intervención humana y donde se han aplicado prácticas para la realización de actividades de producción, ecológicas o sociales (IPCC, 2006). Para el caso de las tierras forestales, el inventario de GEI del país incluye en sus tierras gestionadas a las plantaciones forestales, bosque nativo de segundo crecimiento (renovales), bosque nativo incluido en sistema nacional de áreas silvestres, bosque nativo con plan de manejo según Ley sobre recuperación de bosque nativo y manejo forestal, bosque nativo originado por cambio de cobertura desde plantaciones (restitución), y bosque nativo que se origina de la conversión de otros usos de la tierra (MMA, 2021).

Los bosques de segundo crecimiento que corresponden a renovales y bosque adulto renoval de acuerdo a la clasificación del Catastro de Usos Vegetacionales de CONAF, se mantienen bajo crecimiento hasta alcanzar los 60 cm de diámetro medio cuadrático (DMC). Una vez que alcanzan este diámetro pasan a ser considerados como bosques adultos en equilibrio, contabilizando un balance neto igual a cero (MMA, 2021).

Determinación del Cambio Anual y Diferencia con Acumulación de Stock

Para la estimación de los cambios en las existencias de carbono de la biomasa se utiliza el método de pérdidas y ganancias (Ecuación 1), que requiere que la pérdida de carbono de la biomasa se reste de la ganancia de carbono. Las ganancias incluyen el crecimiento de la biomasa en sus componentes aéreos y subterráneos. Las pérdidas están clasificadas en talas o cosechas madereras, recogida y cosecha de leña y pérdidas por incendios o plagas (IPCC, 2006).

$$\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L$$

Ecuación 1 (Ecuación 2.7 IPCC, 2006)

Donde:

ΔC_B : cambio anual en las existencias de carbono de la biomasa considerando la superficie total (tC/año)

ΔC_G : aumento anual de las existencias de carbono debido al crecimiento de la biomasa para cada categoría de tierra, considerando la superficie total (tC/año)

ΔC_L : reducción anual de las existencias de carbono debida a la pérdida de biomasa para cada categoría de tierra, considerando la superficie total (tC/año)

Las ganancias de las tierras forestales se determinan a partir del crecimiento medio anual por tipo forestal, datos que provienen del Inventario Forestal Nacional (IFN); para el caso de las plantaciones los crecimientos están diferenciados por especie.

El volumen es transformado a biomasa, considerando la densidad básica, el factor de expansión a biomasa aérea y la relación entre la biomasa subterránea y aérea según las distintas especies. Toda esta información se encuentra detallada en el Informe Nacional de Inventario de Gases de Efecto invernadero publicado por MMA (2021).

La pérdida anual de biomasa corresponde a la suma de las cosechas de trozas, leña y otras pérdidas producidas por perturbaciones, como los incendios y plagas. En el caso de los incendios, además de estimar las emisiones de carbono, se requiere estimar las emisiones gases no-CO₂ como el metano y el óxido nitroso.

RESULTADOS

Se presenta la información de absorciones y emisiones para bosque nativo, plantaciones, productos de madera y emisiones de incendios, de acuerdo a los resultados publicados en el Informe del Inventario Nacional de GEI (1990-2018) (MMA, 2021).

Los resultados se presentan mostrando la evolución desde 1990 y cada diez años hasta el 2018.

Bosque Nativo

-Absorciones

El bosque nativo contribuye a la absorción de carbono a través de su crecimiento anual. Los crecimientos de estos bosques fluctúan entre 0,5 a 6,6 m³/ha/año para los distintos tipos forestales de bosque nativo presentes en el inventario de GEI (INFOR, 2016), lo que equivale a capturas anuales de 0,9 a 12,8 tCO₂eq/año en biomasa total.

Al año 2018, la superficie total de bosque nativo que se considera en la contabilidad del inventario de GEI alcanza las 8,03 millones de hectáreas, de las cuales 55,6% corresponde a bosques de segundo crecimiento y 22,9% a bosques que crecen en parques y reservas (Cuadro 1).

Se destaca la superficie de bosque nativo que ingresa con planes de manejo con una participación del 16,6%. La superficie de tierras convertidas a bosque nativo, corresponde a superficies de pastizales que son abandonados y luego se regeneran con especies nativas (4%).

La restitución corresponde a superficie de plantaciones forestales que se convierte a bosque nativo (0,4%).

Es importante señalar que existe una proporción de superficie de bosque nativo que cada año llega a los 60 cm de diámetro (DMC), alcanzando el equilibrio definido en el inventario de gases, con lo cual la absorción neta es igual a cero; en el 2018 esta superficie representa el 0,6% de la superficie de bosque nativo contabilizada en el inventario de gases de efecto invernadero.

Cuadro 1. Participación de bosque nativo según categoría de bosque entre 1990 y 2018

Bosque nativo	Superficie (ha)				Participación porcentual año 2018 (%)
	1990	2000	2010	2018	
Renovales	4.487.884	4.480.842	4.473.677	4.465.385	55,6
Áreas de conservación	1.845.445	1.843.534	1.841.513	1.839.062	22,9
Bosque nativo Plan de manejo	157.583	909.309	1.141.868	1.329.580	16,6
Restitución	3.160	34.762	51.745	30.539	0,4
Tierras Convertidas a Bosque Nativo	21.627	237.892	437.173	324.368	4,0
Bosque nativo en equilibrio	15.451	24.404	33.589	44.333	0,6
Total	6.531.150	7.530.743	7.979.565	8.033.267	100

En el Cuadro 2 se puede ver la evolución de las absorciones de bosque nativo por depósito de carbono. El crecimiento en biomasa total es el que tiene la mayor participación en las absorciones y dentro de éste, se ve que los renovales son los que más contribuyen, alcanzando los mayores aportes entre los años 2000 y 2010. Si bien se observa una disminución en superficie en el mismo período, las mayores absorciones se deben a que los renovales alcanzan mayores crecimientos anuales. Se observa la misma tendencia en las áreas de conservación, solo que los mayores crecimientos se alcanzan entre el 2010 y 2018.

Cuadro 2. Absorciones de bosque nativo para algunos años de la serie temporal del INGEI

Depósito de carbono	Absorciones (kt CO ₂ eq)			
	1990	2000	2010	2018
Biomasa	-63.398,7	-78.202,0	-81.567,1	-80.603,1
Renovales	-43.965,4	-49.248,1	-49.405,6	-47.129,0
Áreas de conservación	-18.183,0	-19.923,0	-20.391,8	-20.108,1
Planes de manejo	-1.223,1	-8.731,2	-11.237,2	-12.979,7
Restitución	-3,5	-38,8	-57,7	-33,9
Conversión de otros usos	-23,7	-260,8	-474,8	-352,4
Materia orgánica muerta	-0,03	-0,3	-0,5	-1,2
Carbono del suelo	-2,6	-28,6	-40,9	-22,6
Total	-63.401,4	-78.231,0	-81.608,5	-80.626,9

(Fuente: Elaboración propia a partir de INGEI 1990-2018)

En el caso del bosque nativo manejado, las absorciones aumentan ya que cada año se incorpora nueva superficie manejada. La restitución y la conversión de otros usos tienen las menores absorciones debido a que la superficie es menor y además el bosque nativo que aparece en estos terrenos corresponde a matorral arborescente con un crecimiento anual muy bajo comparado al crecimiento de los bosques que están en las otras categorías.

Los depósitos de carbono de materia orgánica muerta y carbono del suelo también son valores menores ya que se originan por la restitución y conversión de otros usos, generando mejoras en el carbono del suelo, pero debido a que las superficies anuales son muy marginales, la participación de estos depósitos de carbono también resulta marginal.

-Emisiones

Las emisiones que afectan al bosque nativo se deben principalmente al consumo de leña y a la cosecha de trozas. En el caso de la cosecha de trozas, la producción ha venido disminuyendo desde 1990, cuando alcanzó los 2,3 millones de metros cúbicos, hasta el 2018 en que solo llega a los 260 mil metros cúbicos. La participación de especies nativas en el consumo industrial de madera en troza ha descendido a menos del 2% en los últimos años (INFOR, 2019; Martin *et al.*, 2020).

Por otra parte, el consumo de leña de especies nativas ha sido muy importante (Cuadro 3), alcanzando un máximo de emisiones entre el 2008 y 2009 con valores de 12.900 kt de CO₂ eq, con 9,2 millones de metros cúbicos de consumo de leña (63% del consumo nacional). A partir del 2010 se observa una disminución de estas emisiones que llegan a las 8.240 kt de CO₂ eq en el 2018, siendo responsables del 46% del consumo nacional (5,8 millones de metros cúbicos). La disminución del consumo de leña de

bosque nativo se ha transformado en un aumento del consumo de leña de especies exóticas. Por último, las emisiones por conversión de otros usos corresponden a las emisiones que se producen en el momento de la conversión de tierras que no forestales a bosque nativo. Estas tienen una participación muy marginal en el total de emisiones del sector, ya que la biomasa de estos otros usos de la tierra que se pierde y emite al momento de la conversión es marginal.

Cuadro 3. Emisiones de GEI en bosque nativo

Fuente	Emisiones (kt CO ₂ eq)			
	1990	2000	2010	2018
Cosecha trozas	4.408,0	2.842,9	817,6	501,2
Consumo de leña	6.731,2	10.764,1	11.229,1	8.240,1
Conversión de otros usos	302,0	302,0	243,5	67,7
Total	11.441,2	13.908,9	12.290,2	8.809,0

Plantaciones

-Absorciones

En el caso de las plantaciones, los crecimientos en volumen fustal varían entre 2,3 y 41,0 m³/ha/año, los crecimientos más bajos corresponden a especies como tamarugo y algarrobo y los mayores crecimientos a *Eucalyptus nitens*. Al año 2018 se cuenta con una superficie de plantaciones de 2,28 millones de hectáreas; la distribución de superficie de plantaciones por especie (Cuadro 4) muestra que el 56% corresponde a *Pinus radiata*, mientras que *Eucalyptus sp.* concentra un 38% de la superficie, el resto de las especies tienen una participación menor al 5% de la superficie total de plantaciones. Es importante destacar que dentro de la categoría Otras especies, existe participación de especies nativas, que al año 2018 alcanzó el 0,29% de la superficie total de plantaciones.

Cuadro 4. Distribución de superficie de plantación por especies

Especie	Superficie (ha)				Participación porcentual año 2018 (%)
	1990	2000	2010	2018	
<i>Pinus radiata</i>	1.243.293	1.474.773	1.471.806	1.285.640	56%
<i>Eucalyptus globulus</i>	101.700	256.031	500.428	585.272	26%
<i>Eucalyptus nitens</i>	-	102.585	196.966	273.043	12%
<i>Prosopis chilensis</i> y <i>P. tamarugo</i>	23.801	24.165	25.873	26.322	1%
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	11.343	14.286	16.867	16.507	1%
<i>Populus spp.</i>	3.526	4.415	6.097	5.049	0%
Otras especies*	38.989	60.216	93.419	85.607	4%
Total	1.422.652	1.936.207	2.311.455	2.279.458	100%

*Incluye especies nativas

Si se analiza la información respecto a las absorciones (Cuadro 5), en el año 2018 *Pinus radiata* contribuyó con 67% de las absorciones de CO₂ de la biomasa total (biomasa aérea y radicular), le sigue *Eucalyptus spp.* con un aporte de 29% de las absorciones. El resto de las especies tiene un aporte menor al 3%. Si bien pino radiata tiene crecimientos menores que eucalipto, aporta en forma importante a las absorciones debido a la gran superficie presente en el país.

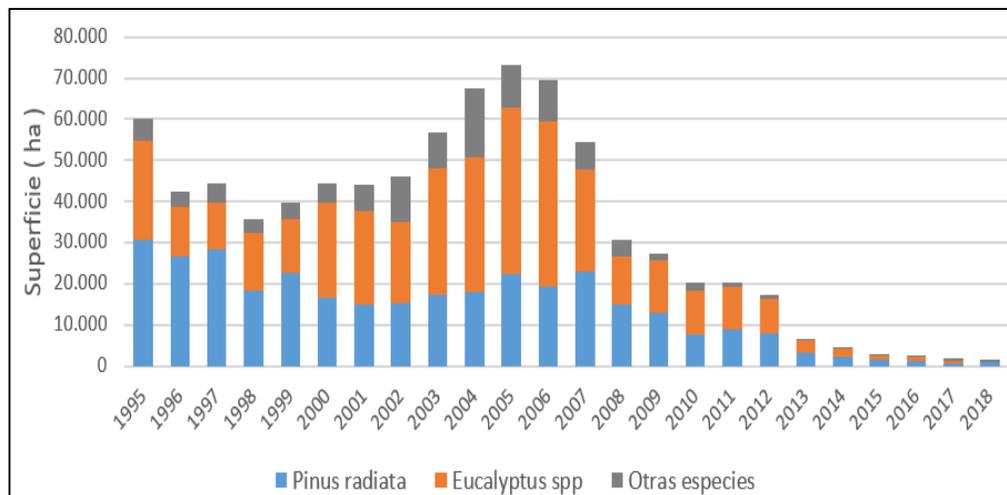
Cuadro 5. Absorciones de GEI en plantaciones por depósito de carbono y especie

Depósito de carbono	Absorciones (kt CO ₂ eq)			
	1990	2000	2010	2018
Crecimiento de la biomasa	-36.768,6	-55.106,8	-72.109,3	-75.120,6
<i>Pinus radiata</i>	-31.624,5	-37.499,1	-37.396,0	-32.699,8
<i>Eucalyptus globulus</i>	-3.787,7	-9.591,8	-20.287,9	-23.856,7
<i>Eucalyptus nitens</i>	-	-6.131,9	-11.706,0	-16.096,9
Otras especies	-1.356,4	-1.884,0	-2.719,3	-2.467,2
Carbono del suelo	-865,3	-611,4	-485,9	-422,0
Total	-37.633,9	-55.718,2	-72.595,2	-75.542,6

En cuanto a la evolución de las absorciones de carbono de las plantaciones, la especie *Pinus radiata* predomina con la mayor participación desde 1990, y a medida que aumenta la superficie aumenta la absorción de carbono, alcanzando un máximo de absorción en 2002 con -38.480 kt CO₂ eq y 1,51 millones de hectáreas. Luego la superficie se estabiliza en torno a 1,4 millones de hectáreas y -37.000 kt CO₂ eq, y desde 2017 presenta una disminución importante, llegando al 2018 a -32.699,8 kt CO₂ eq y 1,28 millones de hectáreas.

Este decrecimiento se debe tanto al término del programa de incentivo a la forestación y su prórroga (2012), como a la gran pérdida por incendios en el año 2017. Por otra parte, se observa como *Eucalyptus globulus* y *nitens* han aumentado en forma sostenida su participación en el tiempo, alcanzando en 2018 una superficie de 858.315 ha y -39.953,6 kt CO₂eq de absorciones. Este aumento se debe a diversos factores, donde destacan la preferencia por parte de pequeños y medianos propietarios por estas especies, menor edad de rotación respecto a pino radiata, mayores crecimientos y optimización de uso de suelos en sectores donde pino radiata presenta crecimientos inferiores (Büchner *et al.*, 2018).

También es importante destacar que la superficie de forestación ha disminuido drásticamente en el último decenio (Figura 1), si bien se alcanzaron valores promedio de 60.000 ha anuales entre 1990 y 2007, alcanzando máximos de 70.000 ha, desde el 2008 han descendido desde 30.000 ha anuales hasta llegar al 2018 a 1.425 ha de forestación (INFOR, 2011, INFOR 2020). Debido a que la superficie de plantaciones se mantiene estable, la absorción de carbono también tiende a estabilizarse y así, sin incorporar nuevas áreas plantadas, no hay mayor margen para obtener mayores tasas de absorción, manteniendo un promedio de absorción de -75.000 kt CO₂ eq.



(Fuente: INFOR, 2020a)

Figura 1. Superficie de forestación de plantaciones desde 1995 a 2018

-Emisiones

En cuanto a las emisiones (Cuadro 6), las mayores emisiones de plantaciones provienen de la cosecha de trozas para fines industriales con 70.542,1 kt CO₂ eq en 2018, donde los principales destinos de abastecimiento corresponden al segmento industrial de pulpa y papel, madera aserrada, tableros y chapas, postes y polines, y otros productos (INFOR, 2020a).

La industria asociada del sector ha basado su producción y crecimiento en el consumo de madera proveniente de plantaciones de *Pinus radiata* y Eucaliptos. Actualmente el sector presenta un consumo promedio de 45,4 millones de m³ssc de madera en troza (período 2015 – 2019), donde el 98,5% de este consumo es explicado por estas especies. Una parte de la cosecha industrial se destina a productos de madera aserrada y tableros que se aportan a otro depósito de carbono, los productos de madera, donde queda almacenado el carbono por un período de tiempo.

Cuadro 6. Emisiones asociadas a plantaciones

Fuente	Emisiones (kt CO ₂ eq)			
	1990	2000	2010	2018
Cosecha trozas	16.646,7	33.039,7	52.268,0	70.542,1
*Consumo de leña exóticas	4.363,6	6.977,9	7.279,4	10.759,6
Conversión de otros usos	3.909,1	3.907,4	2.205,4	1.074,1
Materia orgánica muerta	1.531,7	1.531,7	817,0	502,4
Carbono del suelo	280,0	238,5	190,0	123,8
Total	26.731,1	45.695,4	62.759,7	83.001,9

* Incluye también especies exóticas que se encuentran en cortinas de árboles y frutales

El consumo de leña es el segundo mayor emisor, sin embargo, debe analizarse con cuidado ya que incluye además de especies exóticas de plantaciones forestales, a especies que se encuentran creciendo como cortinas cortavientos o árboles aislados, y a residuos de podas de frutales. Por lo que, las emisiones de leña no pueden atribuirse en su totalidad a las plantaciones forestales, existiendo una fracción que corresponde a la categoría de tierras de pastizales para el caso de árboles que no constituyen bosques, y otra parte a tierras de cultivo para el caso de frutales. No obstante, debido a que la información base de consumo de leña aun no es posible de separar en estas fuentes de origen, todo el consumo de leña de especies exóticas se contabiliza en tierras forestales. Respecto a la tendencia del consumo de leña de especies exóticas, se ve un aumento constante desde 1990 con emisiones de 4.463 kt de CO₂ eq hasta el 2018 con casi 11.000 kt CO₂ eq, correspondientes a un consumo de 6,9 millones de m³, que representan el 54% del consumo nacional.

Las emisiones por conversión de otros usos a plantaciones forestales también corresponden a la biomasa de otros usos de la tierra, que se considera emitida al momento del cambio de uso de la tierra. Para el caso de las plantaciones, la mayor cantidad de superficie proviene de tierras de pastizales que se han transformado en plantaciones forestales. Y la disminución de estas emisiones en los últimos años tiene relación directa con la menor tasa de forestación y por ende de conversión de otros usos a plantaciones forestales.

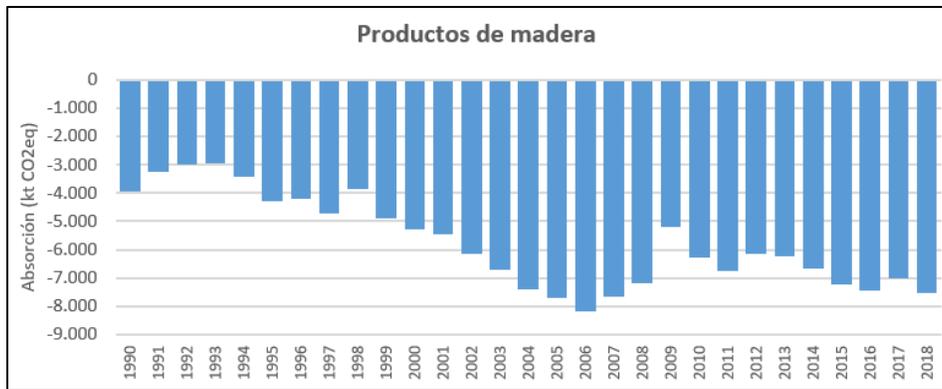
Las emisiones por materia orgánica muerta corresponden a las pérdidas de biomasa muerta que se producen al momento de la sustitución de bosque nativo por plantaciones. Las emisiones han ido disminuyendo debido a que la superficie de bosque nativo que se convierte a plantaciones también ha disminuido, sin embargo, aún persiste superficie de bosque nativo que es sustituida por plantaciones.

Productos de madera recolectada

Los productos de madera recolectada representan un almacenamiento de carbono, ya que parte del carbono de la cosecha se traslada a los productos de madera, los que a su vez van liberando lentamente el carbono a la atmósfera. Las Directrices del IPCC de 2006 establecen que los productos de madera aserrada y tableros pueden almacenar carbono por 30 años y que, para el caso de productos de papel, este puede permanecer por dos años.

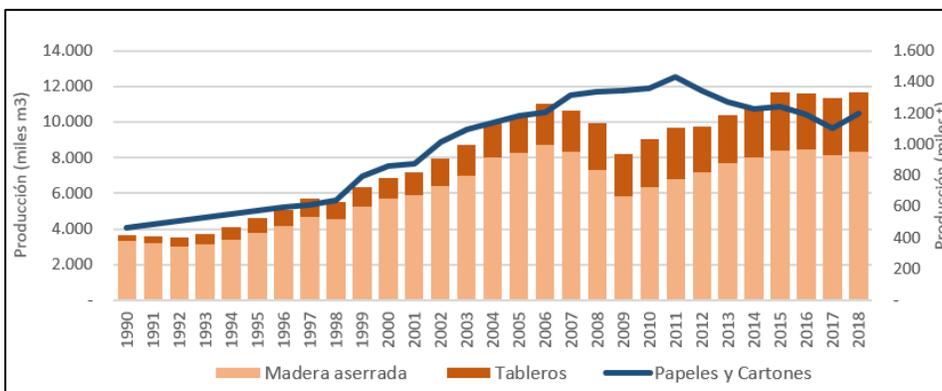
La Figura 2 muestra la contribución de los productos de madera del sector forestal en Chile y que tiene directa relación con la producción de madera aserrada y tableros (Figura 3) que han tenido una tasa creciente de producción, que alcanzó un máximo en año 2006. Luego hay un descenso en la producción de madera aserrada, siendo el año 2009 cuando se alcanza la menor producción, debido a la crisis financiera mundial, ocasión en que el consumo industrial de trozas en Chile fue 8,7% menor al año 2008; en particular el rubro más afectado fue el de la producción de madera aserrada, que disminuyó en 20,1% respecto a la producción del 2008 (INFOR, 2010). Esto afecta directamente al depósito de productos de madera reduciendo su contribución como depósito de carbono.

Con posterioridad al 2009 ha habido una recuperación de la producción que muestra su efecto en la absorción de CO₂. Sin embargo, el año 2017 también se produce una baja en la producción, debido a los grandes incendios que se registraron ese año, donde se vieron afectadas las plantas de aserrío, principalmente de la región del Maule, con el consiguiente impacto en la oferta de madera de plantaciones. La disminución de la producción de madera aserrada alcanzó un 3,6% respecto al año 2016 y se atribuye a los incendios (INFOR, 2018).



(Fuente: MMA, 2021)

Figura 2. Contribución de productos de madera a la absorción de carbono



(Fuente: INFOR, 2020a)

Figura 3. Producción nacional de madera aserrada, tableros y papeles y cartones.

Respecto a la producción de madera aserrada (Figura 4) como contribución de depósito de carbono, son las especies exóticas las que aportan en forma mayoritaria.

Las bajas tasas de cosecha de trozas de especies nativas dan cuenta de la poca participación de estas especies en este depósito de carbono.



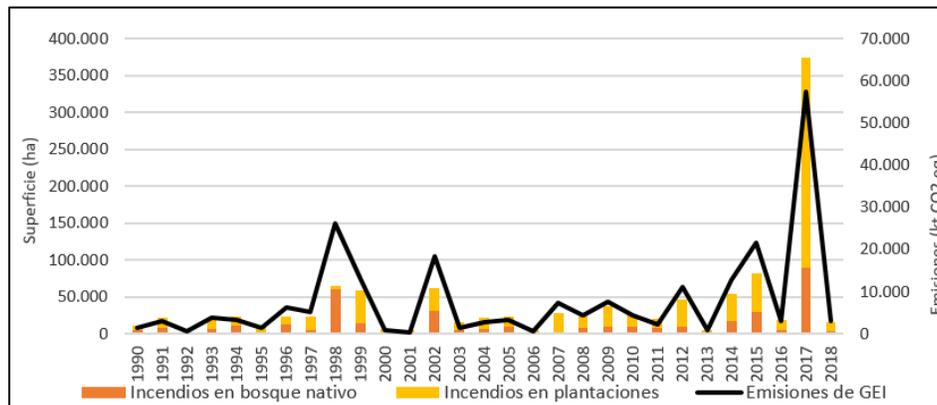
(Fuente: INFOR, 2020a)

Figura 4. Producción de madera aserrada por especies.

Incendios

Los incendios forestales influyen en las emisiones del sector forestal porque al incendiarse los bosques, una gran cantidad de biomasa se pierde y emite, en el año en que ocurre el incendio. Estas pérdidas de biomasa se contabilizan como pérdidas de carbono y emisiones de gases no-CO₂, como metano y óxido nítrico que se emiten producto de la combustión. La importancia de los incendios forestales radica en que son capaces de generar grandes emisiones y modificar la contribución anual de los bosques a la contabilidad del inventario de GEI.

La **Figura 5** muestra el impacto de los incendios en la serie histórica del inventario de GEI, donde se destacan los incendios de 1998, con una superficie de 60.000 ha de bosque nativo que afectó bosques con gran acumulación de biomasa. Ese año el 96% de la superficie incendiada se concentró en las regiones de Los Ríos y Los Lagos, que de acuerdo al IFN, acumulan un stock de 270 a 328 t/ha de biomasa aérea. Los megaincendios de 2017 afectaron una gran cantidad de superficie, que alcanzó las 281.494 ha de plantaciones y 90.258 ha de bosque nativo, generando emisiones iguales a 57.000 kt CO₂ eq, y disminuyendo en un 85% la absorción neta promedio anual que han tenido las tierras forestales desde 1990 hasta 2016.



(Fuente: MMA, 2021)

Figura 5. Superficie de incendios y emisiones de gases de efecto invernadero, período 1990-2018.

Pérdidas de bosques por conversión a otros usos de la tierra

El cambio de uso de la tierra desde bosques a otros usos se conoce como deforestación y en la contabilidad del inventario de GEI, estas pérdidas son emisiones que se atribuyen al uso de tierra al cual es convertido el bosque. En el Cuadro 7 se muestran las emisiones producto de las conversiones de bosque nativo –renovales, bosque adulto y matorral arborescente que forma parte del bosque nativo - y bosque mixto y la superficie promedio anual de conversión a los distintos usos de la tierra para tres períodos del inventario de GEI.

Cuando se reemplaza un bosque por otro uso de la tierra, se pierde todo el stock de biomasa presente en el terreno junto con la materia orgánica muerta y pérdidas de carbono del suelo. Los valores de biomasa aérea para renovales y bosque adulto pueden variar entre 9 a 310 t/ha dependiendo de la región del país (MMA, 2021 e INFOR, 2016), y en el caso de la materia orgánica muerta, la biomasa varía desde 36 t/ha hasta 166 t/ha (INFOR, 2016).

En la década del 90 se llegaron a perder casi 17.000 ha anuales de bosques para ser convertidas en otros usos de la tierra, los pastizales concentran las mayores tasas de conversión equivalentes al 88% del total de emisiones y le siguen, muy por debajo, las tierras de cultivo. En la línea temporal se observa una disminución de las conversiones de bosques a pastizales, disminuyendo a casi un 50% en el período 2010-2018 respecto al período inicial, sin embargo, las tierras forestales convertidas a tierras de cultivo y a asentamientos presentan aumentos de 200 y 300% respectivamente. Aproximadamente el 50% de los bosques convertidos a otros usos corresponde a matorral arborescente.

Cuadro 7. Emisiones y superficie anual de tierras forestales convertidas a otros usos de la tierra.

Período	1990-1999		2000 - 2009		2010 - 2018	
	Emisiones anuales (kt CO ₂ eq)	Superficie anual (ha)	Emisiones anuales (kt CO ₂ eq)	Superficie anual (ha)	Emisiones anuales (kt CO ₂ eq)	Superficie anual (ha)
TF a Cultivo	244	1.332	395	2.170	427	2.684
TF a Pastizales	4.010	14.793	2.869	9.759	2.505	7.963
TF a Humedales	65	165	49	131	15	54
TF a Asentamientos	32	316	64	458	98	459
TF a Otras tierras	173	233	326	351	378	413
Total	4.523	16.839	3.703	12.870	3.423	11.573

DISCUSIÓN

Los bosques en nuestro país actúan como importantes sumideros de carbono para contribuir a la mitigación del cambio climático, ya que las ganancias anuales de carbono son superiores a las emisiones del mismo período. Además, Chile actualizó su Contribución Determinada a nivel nacional (NDC) en el marco del Acuerdo de París, aumentando las metas de mitigación en el sector forestal, con 200 mil hectáreas de manejo y recuperación de bosque nativo y 200 mil ha de forestación (Gobierno de Chile, 2020). En este contexto, es importante considerar los factores que influyen en las absorciones y emisiones del sector forestal para mantener o aumentar la condición de sumidero de carbono del país.

En el caso del bosque nativo y la participación de los productos madereros, estos han perdido cada vez más relevancia dentro de los diferentes segmentos industriales y usos finales a nivel nacional. Prueba de esto, las cifras de consumo de madera en troza de especies nativas han descendido a menos del 1% de participación en los últimos años, presentando un consumo de 224.038 m³ssc de volumen de madera en troza al año 2019, principalmente explicado por el sector del aserrío y en menor medida el sector de tableros – chapas (INFOR, 2020a; INFOR, 2020b). Dentro de los múltiples factores asociados a la disminución en el consumo y baja demanda de productos del bosque nativo se encuentran, la calidad maderera del recurso, incertidumbre de abastecimiento de las unidades productivas, aspectos legales (planes de manejo), accesibilidad al recurso, escasa agregación de valor e innovación en los productos, aspectos productivos y de secado, factores que impactan en la cadena logística, costos, como en la calidad final de los productos.

Una segunda dimensión que se asocia a la pérdida del mercado de las maderas nativas, se relaciona con la entrada de otros materiales sustitutos que la reemplazan en el segmento de la construcción, mercados de apariencia, desarrollo de muebles y decoración, entre otros segmentos que son dominados por materiales como el metal, plásticos, tableros de partículas, fibrocemento y otros (INFOR, 2020b).

El estudio de disponibilidad de renovales estima solo para renovales de Roble-Raulí-Coihue un potencial de 702.142 ha de bosques que cumplirían las condiciones necesarias para un manejo con fines productivos (Martin *et al.* 2020). De este conjunto, hoy solo se manejan 56.842 ha con plan de manejo aprobado por CONAF (Müller-Using *et al.*, 2020).

A pesar de que el inventario de GEI ya tiene contabilizada toda la superficie de renovales con un crecimiento promedio que entrega el IFN, estos bosques podrían aumentar su impacto siempre y cuando se logre mejorar su tasa de crecimiento a través del manejo. Según las tasas de crecimiento de bosques de roble manejados con fines madereros, publicadas recientemente por Pilquinao *et al.* (2020), la reacción de los árboles a la intervención silvícola significó un 14% de aumento en el crecimiento promedio de los rodales. Aunque las cifras publicadas muestran el efecto del manejo, también transparentan que a partir de las actuales prácticas silvícolas no se logrará superar el incremento periódico anual que aplica el inventario de GEI. Sin embargo, con un cambio de silvicultura se podría lograr, pues variados estudios han demostrado que un manejo temprano e intensivo de estas formaciones puede duplicar el crecimiento volumétrico anual, respecto de los datos ocupados actualmente en el inventario de GEI (Grosse, 2009; Donoso *et al.*, 1993; Müller-Using *et al.* 2020).

Otro efecto del manejo silvícola sostenible y dirigido a la producción de madera de alto valor sería aumentar el ciclo de vida de los productos madereros. Actualmente, la leña es el principal producto que se genera del bosque nativo, alcanzando el 46% del consumo total de leña y un 0,5% del consumo total de trozas industriales que se destinan a productos aserrables (INFOR, 2020b). Sin embargo, las

proyecciones de Martin *et al.* (2020) indican que sería posible aumentar la proporción de madera aserrada, en la gama de productos del bosque nativo, del actual 4% a un 45%. El supuesto de esta cifra es la incorporación continua de nueva superficie al manejo forestal sustentable y un trozado optimizado que prioriza siempre el producto de mayor valor. De esta manera se podría mejorar considerablemente la contribución de las especies nativas al depósito de carbono de los productos de madera recolectada.

Para lograr cada una de las dos opciones se requiere una revisión profunda de la política forestal del país y sus instrumentos legales, como es la Ley 20.283 de Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, la cual a 13 años de su promulgación no ha mostrado los impactos esperados (Müller-Using, 2020; SIMEF, 2020)

En el caso de las plantaciones forestales, principal fuente de abastecimiento de madera en troza de la industria forestal, se observa un nulo crecimiento respecto a la incorporación de nuevas superficies de plantaciones a través de la forestación, presentando una estabilización respecto a la superficie total plantada en los últimos años. Considerando el período 2010-2019 la superficie de plantaciones se presentó en rangos entre los 2,28 y 2,44 millones de hectáreas, variaciones asociadas a actividades de cosecha, incendios forestales y reforestación de estas áreas.

Respecto a los actuales niveles de producción del sector y el recurso plantaciones, el último estudio de disponibilidad de madera en plantaciones de pino radiata y eucaliptos, presentó para el escenario base una disminución de la proyección de la oferta de volumen de madera disponible (Büchner *et al.*, 2018). Las plantaciones de Eucaliptos presentaron una oferta bastante ajustada respecto a las proyecciones de demanda del sector, esto considerando la proyección de consumo de nuevos proyectos (nueva planta), que, a la fecha, aún no opera a plena capacidad. En cuanto a la oferta de madera en trozas de *Pinus radiata*, de acuerdo al consumo proyectado, éste se presentaba en déficit, según los efectos estimados de los mega incendios del 2017, proyectando una recuperación en un horizonte cercano a los 20 años posterior a los incendios. El mismo estudio proyecta un escenario de mejoramiento genético en el crecimiento y rendimiento y solo se observaron incrementos para la especie *Eucalyptus nitens*, ya que la especie *Eucalyptus globulus* se ve fuertemente afectado por los efectos de la mega sequía y la presencia del defoliador *Gonipterus platensis* (Coleoptera: Curculionidae) que se alimenta de las hojas y brotes nuevos, afectando el desarrollo de las plantaciones.

Si esta tendencia se mantiene en las plantaciones forestales, sin nuevas forestaciones las absorciones anuales de carbono se mantendrían relativamente constantes en el tiempo, las emisiones por cosecha aumentarían en la medida que los rendimientos de las plantaciones lo permitan. Para el caso de los productos de madera hay oportunidades de crecer como depósito de carbono, siempre que la industria destine la producción a productos de madera aserrada y tableros

Las dos variables que afectan a los bosques como sumideros de carbono son la deforestación y los incendios forestales. Al analizar el INGEI se ve que las tasas de deforestación han disminuido desde 1990 a la fecha, pero siguen existiendo con tasas anuales importantes e impactan no solo por la pérdida de carbono, sino por la pérdida de biodiversidad, producto de la fragmentación del paisaje (Echeverría *et al.* 2006).

Por otra parte, los incendios forestales afectan de manera importante la contribución anual de los bosques como sumidero de carbono. En los últimos años en Chile, estos eventos han afectado a grandes superficies de plantaciones y vegetación natural. Al analizar las cifras de incendios para el período 2010-2018, se observa un aumento de incendios de gran magnitud, considerando los años 2014, 2015 y los mega incendios del 2017 (CONAF, 2021). Esta tendencia se explica principalmente por factores asociados al cambio climático, considerando la prolongada y extensa sequía en la zona centro-sur del país, olas de calor, y la actividad humana (González *et al.* 2020). Por lo tanto, es importante, centrar los esfuerzos en disminuir estas emisiones.

CONCLUSIONES

Las tierras forestales son los principales sumideros de carbono del país y junto a los productos de madera concentraron en el 2018 una absorción neta de -67.878,0 kt CO₂eq. Si bien las absorciones de carbono provenientes de plantaciones son solo un 6% menor al del bosque nativo, es importante notar que esto se da en una superficie cercana al tercio de la superficie de bosque nativo que se contabiliza en

el inventario GEI. Las emisiones de las plantaciones como cosecha y consumo de leña son nueve veces mayor a las emisiones del bosque nativo contabilizado. Lo anterior debido principalmente a la baja utilización de los bosques nativos respecto de los bosques plantados. Por otra parte, las plantaciones contribuyen con casi la totalidad del aporte de absorciones de carbono de los productos de madera.

En el contexto actual, donde se busca aumentar la participación de materias primas sustentables y renovables, tanto en la producción de energía como en el ámbito productivo, la biomasa y la madera jugarán un rol más preponderante cada día, lo que influirá en su rol como sumidero de carbono. Esto se conecta con los compromisos país en el marco del Acuerdo de París, donde hay un compromiso de generar nuevas plantaciones, incluyendo plantaciones permanentes de especies nativas y aumentando la superficie de bosque nativo manejado.

Las actuales tasas de crecimiento del bosque nativo, y por tanto sus tasas de captura de carbono, pueden aumentarse notoriamente mediante manejo silvícola sustentable efectuado en forma oportuna. Esto aumentaría la participación de los productos aserrables, con el consecuente aumento de carbono capturado en los productos de madera recolectada y desplazando emisiones de otros materiales de construcción. Lo que se conjuga, además, favorablemente, con el incentivo a la construcción con distintos productos en base a madera.

Finalmente, no solo la mejora en las tasas de absorción, sino también la disminución de las tasas de emisión redundará en mayores capturas netas. En este aspecto, la diversificación de las especies forestales utilizadas en los diversos compromisos internacionales y el aumento de la complejidad estructural de los bosques nativos promoverá una mejor forma de enfrentar la amenaza de los incendios forestales.

REFERENCIAS

- Büchner, C., Martín, M., Sagardia, R., Avila, A., Molina, E., Rojas, Y., Muñoz, J. *et al.* (2018). Disponibilidad de Madera de Plantaciones de *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens* 2017 - 2047. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 220. 123 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/28294>
- CONAF. (2021). Incendios Forestales. Estadísticas Históricas. En: <https://www.conaf.cl/incendios-forestales/incendios-forestales-en-chile/estadisticas-historicas/> Consulta: 27 octubre, 2021.
- Donoso P., Donoso, C. & Sandoval, V. (1993). Estudio de crecimiento de plantaciones y renovales manejados de especies nativas en el área andina de las provincias de Cautín y Valdivia. *Ciencia & Investigación Forestal*, 7(2): 255-287. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1993.188>
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas J., Rey-Benayas JM., Lara A. & Newton A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biol Conserv.*, 130:481–494. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.017>
- Gobierno de Chile. (2020). Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile, Actualización 2020. 51 p. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf
- González, M.E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M. *et al.* (2020). Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile.
- Grosse, H. (Ed). (2009). *Silvicultura del bosque nativo chileno*. Instituto Forestal. Santiago. 136 p.
- INFOR. (2010). Anuario Forestal 2010. Boletín Estadístico N° 128. Instituto Forestal, Chile.143 p.
- INFOR. (2011). Anuario Forestal 2011. Boletín Estadístico N° 132. Instituto Forestal, Chile.146 p.
- INFOR. (2016) Los Recursos Forestales en Chile. Informe Final, Inventario Continuo de Bosque nativo y Actualización de Plantaciones Forestales
- INFOR. (2018). Anuario Forestal 2018. Boletín Estadístico N° 163. Instituto Forestal, Chile.198 p.
- INFOR. (2019). Anuario Forestal 2019. Boletín Estadístico N° 168. Instituto Forestal, Chile. 208 p.
- INFOR. (2020 a). Anuario Forestal 2020. Boletín Estadístico N° 174. Instituto Forestal, Chile. 256 p.

- INFOR. (2020 b). Propuesta y Manejo de Bosque Nativo para Diferentes Alternativas de Comercialización de la Madera. Proyecto Financiado a través del Fondo FIC-R del Gobierno Regional y su Consejo Regional. BIP 30485696-0. Informe Final. Instituto Forestal, Chile. 162 p.
- IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra.
- Martin, M., Büchner, C., Sagardia, R., Bahamondez, C., Rojas, Y., Guzmán, F., Barrientos, M. *et al.* (2020). Disponibilidad de Madera Nativa en Renovales de Roble – Raulí – Coihue, Regiones de Ñuble a Los Ríos. Informe Técnico N° 237. Instituto Forestal, Chile. 78 p.
- MMA (Ministerio del Medio Ambiente). (2021). Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018. Oficina de Cambio Climático. Santiago, Chile.
- Müller-Using, S. (Ed). (2020). El manejo de Renovales en una resumida mirada: estadísticas e investigaciones en curso. Documento de Divulgación 52. Instituto Forestal, Chile. 60 p.
- Pilquinao, B., Martin, M., Müller-Using, S., Rojas, Y., Villalobos, E., Guíñez, R., & Barrientos, M. (2020). 30 años de manejo de renovales de roble: un análisis de la reacción en crecimiento y estructura. *Ciencia & Investigación Forestal*, 26(3): 7-32. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.535>
- SIMEF. (2020). Reporte Consumo de Leña por Región y Comuna. En: <https://simef.minagri.gob.cl/herramientas/reporte-estadistico-ver>



ARTÍCULO

Propuesta para la definición de un diámetro meta para los árboles futuro en renovales de roble (*Nothofagus obliqua*).

Sabine Müller-Using^{1*}, Yasna Rojas², Marjorie Martin³

¹Dr. Instituto Forestal, Valdivia, Chile. smuller@infor.cl

²Dr. Instituto Forestal, Valdivia, Chile. yrojas@infor.cl

³Ing. Forestal. Instituto Forestal, Valdivia, Chile. mmartin@infor.cl

*Autor para correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.553>

Recibido: 21.12.2021; Aceptado 27.12.2021

RESUMEN

Los bosques de roble (*Nothofagus obliqua*), en el centro sur de Chile, constituyen masas forestales relativamente homogéneas, de fácil acceso, de buen crecimiento y madera de valor, razón por la cual son frecuentemente manejados con los incentivos mediante la ley de bosque nativo. El sistema silvícola que se ha implementado en estos bosques, por sobre otros métodos, es el del manejo de árbol futuro. En el presente estudio se entrega una propuesta para la decisión del momento de cosecha, a través de la definición de un diámetro meta para los árboles futuro que permita optimizar el beneficio económico. La metodología ocupada se basa en un modelo de cálculo de rentabilidad que propone que los ingresos adicionales por la madera, que se producen por el crecimiento del árbol, deben compararse con el interés adicional de esperar año a año para alcanzar un diámetro meta. Se aplicó este método en dos rodales de roble de la región de Los Ríos. Los resultados mostraron que el diámetro meta puede variar entre 34 y 46 cm, según la tasa de rentabilidad esperada y la condición inicial del rodal, expresada en la distribución diamétrica de los árboles futuro. Entre más alta era la rentabilidad esperada, más bajo el diámetro meta.

Palabras clave: Roble, *Nothofagus obliqua*, cosecha, diámetro meta, rentabilidad

SUMMARY

Nothofagus obliqua forests in south-central Chile are relatively homogeneous forest stands, easy to access, with good growth and valuable timber, which is why they are often managed with incentives through the native forest law. The silvicultural system that has been implemented in these forests, over other methods, is the future tree management. This study provides a proposal for deciding the time of harvest, through the definition of a target diameter for future trees to optimize the economic benefit. The methodology used is based on a profitability calculation model that proposes that the additional income from timber, which is produced by the growth of the tree, should be compared with the additional interest of waiting year to year to reach a target diameter. This method was applied in two *Nothofagus obliqua* dominated stands in the Los Ríos region. The results showed that the target diameter can vary between 34 and 46 cm, depending on the expected rate of return and the initial condition of the stand, expressed in the diameter distribution of the future trees. The higher the expected profitability, the lower the target diameter.

Keywords: *Nothofagus obliqua*, harvesting, target diameter, rentability.

INTRODUCCIÓN

Los bosques del tipo forestal Roble-Raulí-Coihue constituyen masas forestales relativamente homogéneas, de fácil acceso y compuestas por especies de buen crecimiento y madera de valor, razón por la cual actualmente son las formaciones con mayor superficie manejada con los incentivos mediante la ley de bosque nativo (Müller-Using, 2020b). Hoy, parte de este recurso se encuentra en un estado donde la medida silvícola indicada es la cosecha y regeneración, sea porque el bosque se encuentre maduro o porque su condición es de muy baja densidad o calidad y requiera una renovación para mejorar la masa forestal (Araya, 2011; Müller-Using *et al.*, 2012).

En Chile el manejo de los bosques naturales ha sido fuertemente influenciado por la asistencia técnica recibida a través de CONAF, y por el apoyo de las agencias alemanas DED, GTZ y KFW. Entre los años 1997 y 2006 este trabajo colaborativo puso su foco en el manejo de renovales, con un gran énfasis en la extensión forestal hacia pequeños y medianos productores (Lara *et al.*, 2010). El sistema silvícola que se

ha implementado en esos años por sobre otros métodos, es el del manejo de árbol futuro. Esta experiencia aún sirve como base para el acompañamiento de los programas de manejo asociados a la hoy vigente Ley N° 20.283 para la recuperación y manejo del bosque nativo (MINAGRI, 2008). Hasta la fecha las bonificaciones de esta ley se han concentrado en las cortas intermedias o raleos (SIMEF, 2021). A modo referencial, el presupuesto del Fondo de Conservación, Recuperación y Manejo Sustentable del Bosque Nativo en el año 2021 cuenta con M\$ 3.021.705 con la meta de bonificar a 600 proyectos (DIPRES, 2021).

Los raleos, cuando son actividades silvícolas dirigidas a la producción de madera, representan inversiones para la calidad futura y el valor comercial de la madera al momento de la cosecha. Dados los largos plazos de la producción forestal, las proyecciones económicas en las cuales se basa esta inversión tienen un alto grado de incertidumbre. Aun cuando en los renovales no ha habido una inversión inicial de plantación que requiera capitalizarse, la rentabilidad del manejo (clareos y raleos) es determinante en la decisión del momento de la cosecha y regeneración del bosque. Considerando que los raleos se financien a través de la madera que arrojan, la inversión realizada consiste en el costo de oportunidad de no cosechar aún los árboles futuro y dejarlos crecer. Si se cosecharan y se invirtieran los ingresos en otra instancia (por ejemplo, en una cuenta bancaria al 2%, en acciones al 4% o en futuros al 6%), esto no debería ser más rentable que dejar que los árboles crezcan hasta un diámetro por determinar. Esta comparación es válida en la medida en que las otras alternativas impliquen el mismo riesgo que dejar los árboles crecer.

Específicamente, en el sistema silvícola del árbol futuro se busca acumular en pocos árboles de gran valor el volumen de madera posible de producir en un área definida, en un período de tiempo acotado. Para ello se definen tempranamente los árboles que llegarían al final de la vida del rodal, lo que se hace en función de su vitalidad, sanidad y forma (Grosse & Quiroz, 1999). Económicamente esto tiene un riesgo, por el incierto comportamiento en crecimiento y sanidad que los árboles elegidos puedan desarrollar a futuro. El riesgo se reduce a través de un especial cuidado y liberación periódica de los árboles, fomentando así un óptimo desarrollo.

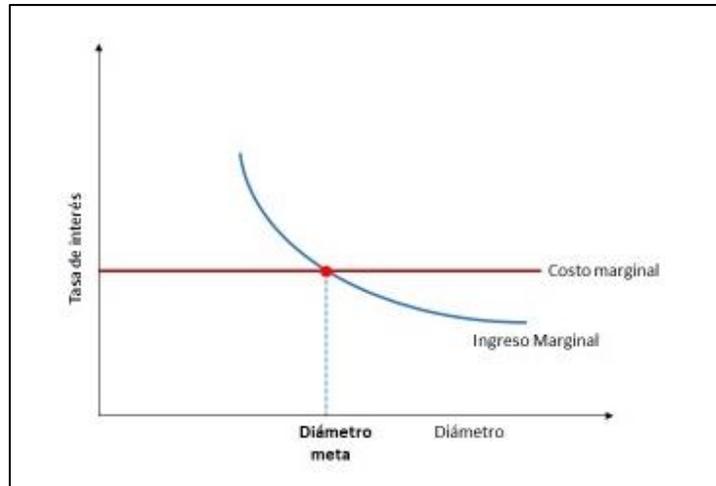
En esta lógica, la presente propuesta define la decisión de la cosecha en base a esta cohorte de árboles, tempranamente seleccionados y beneficiados a través del manejo, como portadores del valor del rodal. Pero ¿cuál es el diámetro que debieran alcanzar estos árboles para optimizar el beneficio económico que puedan generar?

Al respecto, se presenta una metodología para definir el diámetro meta de los árboles futuro de un rodal en base a parámetros económicos. Ésta se basa en los datos de crecimiento de los 20 rodales manejados a través del raleo de árbol futuro publicados por Pilquinao *et al.* (2020). La contribución consiste en una proyección del incremento en valor, y la predicción del momento oportuno de cosecha y regeneración, basado en la rentabilidad de los estos árboles futuro. Esta propuesta metodológica está concebida como una herramienta de toma de decisión para la gestión de propietarios y silvicultores.

El trabajo se plantea como el desarrollo metodológico para generar un criterio de decisión de cortar o mantener creciendo a los árboles futuros del rodal. La decisión de corta supondrá entonces el iniciar la fase de regeneración. Por lo tanto, el énfasis se centra en el método de cálculo y se agrega, a modo de ejemplo, su aplicación a casos concretos. La propuesta está enfocada en bosques secundarios de roble (*Nothofagus obliqua*) en las regiones de Los Ríos y La Araucanía.

MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología ocupada en este estudio para la definición de un diámetro meta se basa en el modelo de cálculo de rentabilidad de Thünen (1826) que propone que los ingresos adicionales por la madera que se producen por el crecimiento del árbol deben compararse con el interés adicional de esperar año a año para alcanzar un diámetro meta. De manera equivalente, si el porcentaje de crecimiento en valor es menor que la tasa de interés, entonces se ha alcanzado el diámetro objetivo (Figura 1). Es importante considerar que en este método se considera que solo el capital es escaso, no así la tierra.



(Fuente: Thünen, 1826)

Figura 1. Expresión gráfica del modelo de rentabilidad para el diámetro meta.

El mismo método fue aplicado por Duerr *et al.* (1956) detallando los siguientes pasos:

- Calcular el valor actual de la madera en pie de un árbol en base a productos a obtener
- Determinar el valor de la madera en pie en diámetros futuros del árbol
- Determinar la tasa de interés deseada.
- Comparar el ingreso marginal del valor de madera con el costo marginal (costo de oportunidad del capital).

A continuación, se detalla cómo se ha aplicado esta metodología para abordar la oportunidad de cosecha y regeneración de bosques secundarios de roble en las regiones de Los Ríos y La Araucanía.

Área de Estudio

La información del estudio proviene del área ubicada entre la depresión intermedia y precordillera de los Andes de las Regiones de La Araucanía y Los Ríos, entre los 39°07'53" y los 40°11'57" de Latitud Sur y los 72°51'46" y 72°00'37" de longitud Oeste y a una altitud entre los 80 y 720 msnm. El área presenta un clima templado lluvioso (Veblen *et al.*, 1981), caracterizado por temperaturas moderadas y altas precipitaciones anuales que oscilan entre los 1.500 y 3.000 mm. Los suelos se caracterizan por su origen de cenizas volcánicas recientes, comúnmente llamados trumaos, y que corresponden a suelos profundos y de buen drenaje (Peralta, 1976). Todas estas características determinan una zona de buen crecimiento para roble (Donoso *et al.*, 1993).

Datos

Los datos agregados a nivel de rodal, así como de los árboles en categoría de futuro y las funciones de crecimiento se basan en datos levantados y publicados por Pilquinao *et al.* (2020), los cuales provienen de un muestreo en el año 2019 de rodales manejados con fines comerciales. En cada uno de los rodales se estableció un conglomerado compuesto por tres parcelas circulares de 500 m². Se registró las siguientes variables de estado de los árboles individuales: especie, DAP, altura total, altura comienzo de copa, diámetro de copas, posición en el dosel, estado sanitario y forma de fuste; se identificó a los árboles con potencial futuro considerando las siguientes características: recto, sano, buena calidad, con potencial maderero y pertenecer al dosel superior. Esta cohorte se identificó como los árboles futuro, objetos del presente estudio. Para ellos se determinó el crecimiento a través de la extracción de tarugos de diez individuos pertenecientes al estrato superior de cada rodal. Si bien en los rodales analizados se encontraban diversas especies tolerantes y semitolerantes acompañando a la especie principal roble, para efectos de este estudio se consideró solo robles como árboles futuro y los datos de crecimiento se refieren solo a esta especie.

La función de crecimiento en dap fue construida sobre la base de los 195 árboles cuyos tarugos estuvieron en condición adecuada para su medición. La siguiente figura muestra la distribución diamétrica de esta base muestral.

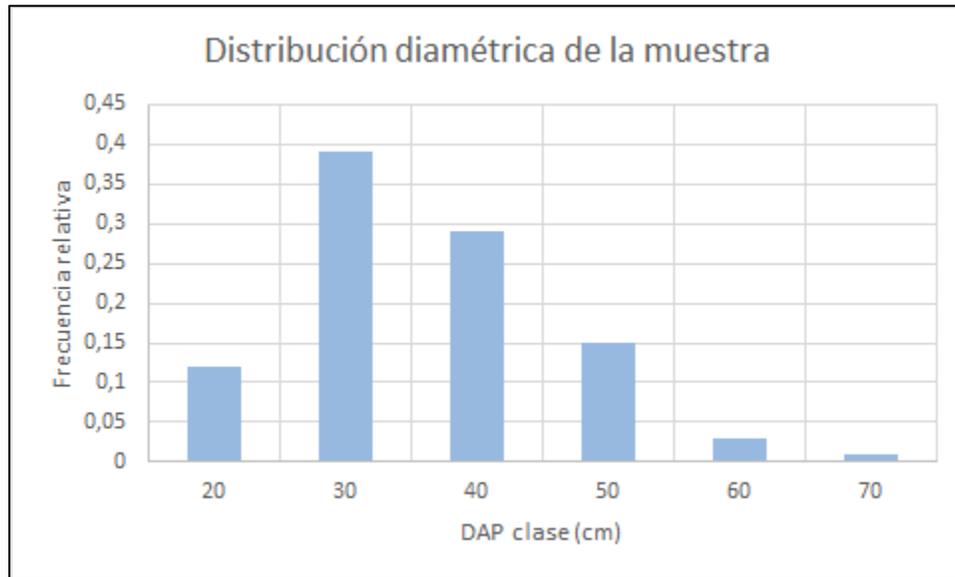


Figura 2: Frecuencia Relativa de la muestra de árboles tarugados por rangos de clase de diamétrica.

En cuanto a los datos utilizados para la evaluación económica, específicamente la información sobre precios y productos se basa en la publicación de Martín *et al.* (2020).

Proyección de los Árboles Futuro

Para los casos presentados como ejemplo, se construyó funciones de altura en función del dap, funciones de crecimiento en diámetro de acuerdo a los resultados del análisis de los datos de tarugo de incremento, y la selección de un modelo de volumen de árbol individual. Con estas funciones fue posible proyectar el crecimiento en volumen de los árboles.

La función de crecimiento en DAP se obtuvo de los datos levantados en terreno por Pilquinao *et al.* (2020) en conjuntos con datos del IFN; las funciones de Altura total y del DAP sin corteza también provienen del trabajo de Pilquinao *et al.* (2020); la función de ahusamiento corresponde a la propuesta por Kahler (1993).

-Función de Crecimiento en DAP:

$$\Delta DAP = 0,00000054 * dap^3 - 0,000174 * (dap^2) + 0,01 * dap + 0,3 \quad , \text{ con } R^2 \text{ Aj} = 0,85 \quad (1)$$

-Función de la altura total:

$$H = \exp(3,8157 + (-13,532/dap) + (-34,001 * (1/dap)^2)), \text{ RMSE: } 1,41 \quad (2)$$

$$H = \exp(3,455 + (3,5926/dap) + (-172,36 * (1/dap)^2)), \text{ RMSE: } 1,82 \quad (3)$$

-Función de DAP sin corteza:

$$D = 0,9403 * dap \quad (4)$$

-Función de Ahusamiento:

$$d/D = 1,56139 * ((H-h)/(H-1,3)) - 2,84647 * ((H-h)/(H-1,3))^4 + 2,33654 * ((H-h)/(H-1,3))^5 \quad (5)$$

Donde;

- D: dap del árbol sin corteza (cm)
- dap: dap del árbol con corteza (cm)
- d: diámetro del árbol sin corteza a la altura h (cm)
- h: altura de medición correspondiente, con h >0,3 m (m)
- H: Altura total (m)

Se generó las tablas de rodal en clases de un cm, y se proyectó el crecimiento por 30 años con las funciones antes mencionadas. La cubicación de las trozas se realizó por Smalian, se acumuló los volúmenes por tipo de productos y se generó las tablas de productos proyectadas.

Proyección de Productos de los Árboles Futuro

En un paso posterior, se realizó una aproximación a los productos madereros que actualmente se podían obtener a partir de los árboles futuro y su proyección en relación al crecimiento del rodal para un período de 30 años. Para ello se aplicó un esquema de trozado para un árbol tipo por cada clase diamétrica. El trozado se realizó según los productos y dimensiones de la Tabla 1.

Supuestos de Proyección de Rentabilidad

Definición de productos y precios

Se estableció los precios y costos de los productos de acuerdo la información de mercado que se encuentra en el año de la evaluación (Cuadro 1). Como tasa de interés para la evaluación se usó un rango de tres tasas de interés, 6%, 4% y 2%.

Cuadro 1. Características de productos esperados, precios y costos

Producto*	Nomenclatura	Diámetro mínimo (cm)	Largo (m)	Precios puesto en predio	Costos ** (\$/m ³)
Troz aserrables de alto valor	P1	> 34	3,60	55.000 \$/m ³	25.200
Troz aserrables de bajo valor	P2	> 34	2,60	42.000 \$/m ³	25.200
Trozas cortas aserrables	P3	> 20	2,44	29.000 \$/MR	10.000
Trozas pulpables	P4	> 10	2,44	25.000 \$/MR	10.000
Leña	P5	> 5	1,00	18.000 \$/m	13.500

* La definición de productos proviene del Estudio de disponibilidad futura de renovales de Ro-Ra-Co (Martin et al., 2020)

** Los costos corresponden a costos de volteo, maderero, fajas y caminos; los precios son para productos puestos en predio. La información proviene de encuestas a propietarios forestales de la región de Los Ríos.

Procedimiento Metodológico

Para cada año de evaluación se calculó el ingreso neto correspondiente a la expresión 6.

$$I_{neto} = \sum_{p=1}^5 I - \sum_{p=1}^5 C \tag{6}$$

Donde:

- I : Ingresos, para cada tipo de producto (P1-P5)
- C: costos para cada tipo de producto (P1-P5)

En cada año de la evaluación se evaluó la decisión de esperar que el diámetro de los árboles futuros crezca un centímetro más, lo que de acuerdo a la función de proyección empleada en este trabajo equivale a esperar dos años. Luego se comparó el ingreso neto marginal de esperar estos dos años (ingreso marginal) con el costo de oportunidad del capital a determinada tasa de interés de acuerdo a:

$$I_M = I_{netof} - I_{netoa}$$

$$C_M = (I_{netoa} * (1 + i)^{(f-a)}) - I_{netoa}$$

Si $I_M > C_M$ decisión de mantener creciendo

Si $I_M < C_M$ decisión de cortar

Donde:

- I_M : Ingreso Marginal;
- $I_{neto f}$: Ingreso neto año futuro;
- $I_{neto a}$: Ingreso neto año actual;
- C_M : Costo marginal (costo oportunidad de capital);
- i : Tasa de interés
- f : año futuro
- a : año actual o de la evaluación

Si el ingreso marginal de esperar a que el diámetro crezca un centímetro adicional es superior al costo marginal, la decisión es esperar alcanzar ese diámetro y no cortar.

Si el ingreso marginal es menor que el costo marginal, entonces la decisión es cortar los árboles futuros. Lo que de acuerdo a Thünen es que, si el porcentaje de crecimiento en valor es menor que la tasa de interés, se ha alcanzado el diámetro objetivo.

RESULTADOS

Se presentan en esta sección las proyecciones para dos rodales de la Comuna de Lanco, Región de los Ríos y se define en base a los resultados el diámetro óptimo para la cosecha de los árboles futuros y el año en el cuál este se alcanza.

En el Cuadro 2 se muestran los datos de los rodales seleccionados para este ejemplo y en las Figuras 3 y 4 sus respectivas distribuciones diamétricas.

Cuadro 2. Datos dasométricos de dos rodales de roble en la Comuna de Lanco, predio Porvenir.

Rodal	Edad	Número de árboles (N°/ha)	Área basal (m ² /ha)	Diámetro medio cuadrático (cm)	Volumen (m ³ /ha)	Árboles futuro (N°/ha)
1	51	553	27	25,8	244	127
2	42	673	33	25,4	359	207

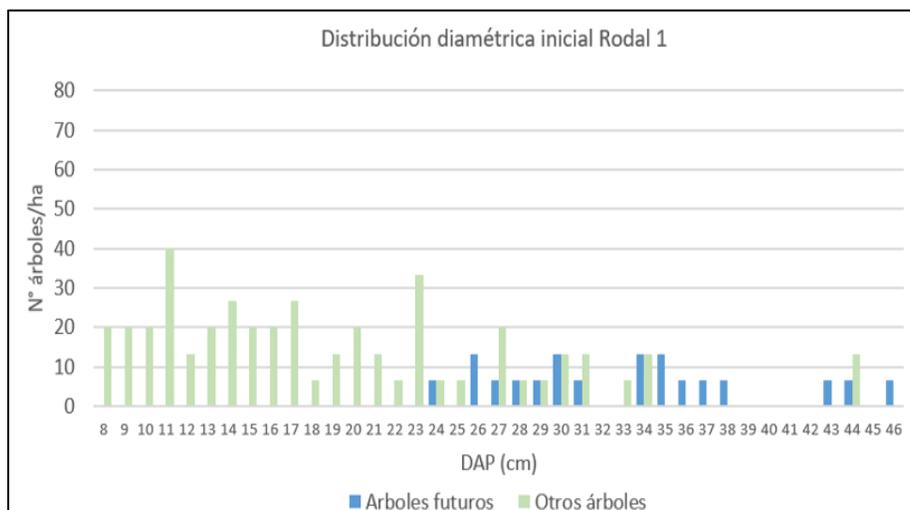


Figura 2. Distribución diamétrica de Rodal 1

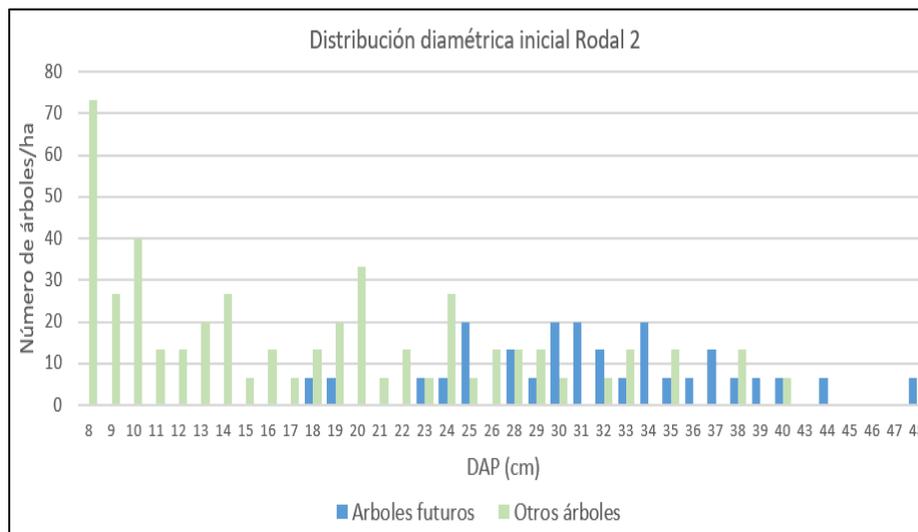


Figura 3. Distribución diamétrica de Rodal 2

Proyección de productos de árbol individual

Para visualizar la metodología de trabajo la Figura 4 muestra la proyección en productos para un árbol individual, que en este caso al día del registro tenía 25 cm de dap.

Se puede observar como a través del crecimiento de altura y diámetro a través de los años se diversifican y mejoran los productos a obtener. Recién con 39 cm de diámetro se obtiene una troza del producto 1.

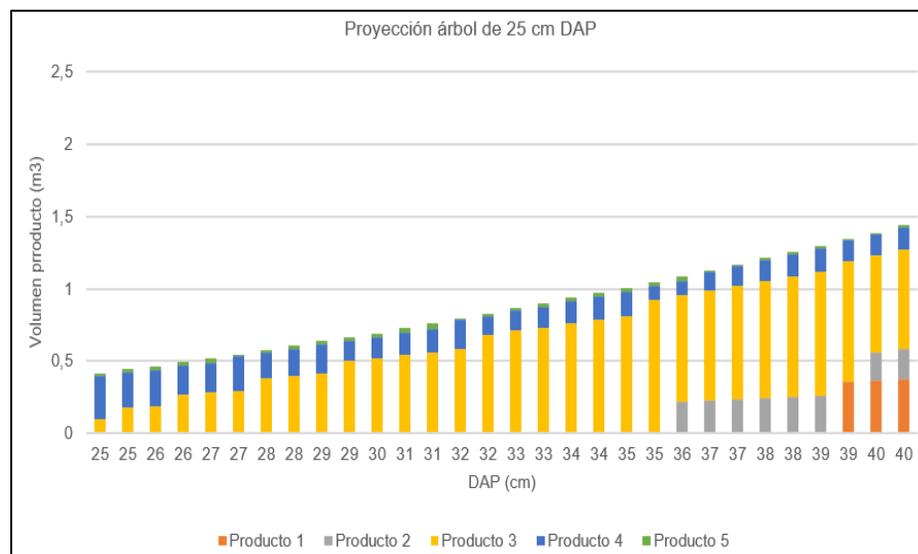


Figura 4. Proyección de productos de un árbol individual de 25 cm (P1= Troza aserrable de alto valor; P2= Troza debobinable; P3= Troza aserrable corta; P4= Trozas pulpable; P5= Leña)

El segundo árbol ejemplo parte con 36 cm de dap y en la Figura 5 se hace evidente que después de alcanzar los 42 cm comienza a aumentar el volumen de madera aserrable (producto 1).

Esto ocurre en saltos notables tras un período de varios años, siempre cuando el diámetro en altura supera el diámetro mínimo para sumar una troza más al volumen de este producto.

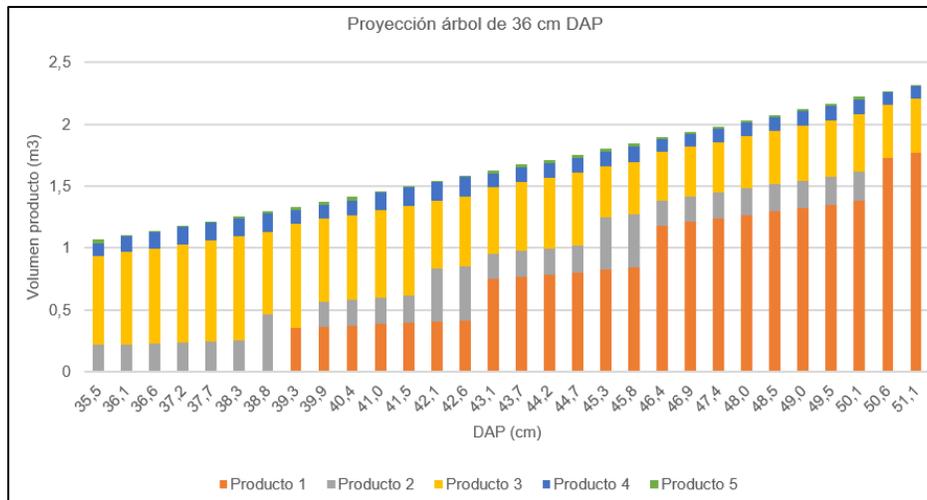


Figura 5. Proyección de productos de un árbol individual de 36 cm (P1= Troza aserrable de alto valor; P2= Trozas debobinable; P3= Troza aserrable corta; P4= Trozas pulpable; P5= Leña)

Es posible definir un esquema de manejo donde los árboles individuales sean cosechados una vez que alcancen el diámetro objetivo (Toral *et al.*, 2014), sin embargo los bosques de roble tienen una dinámica que invita a un manejo coetáneo y de estructura homogénea que requiere de una cosecha a nivel de rodal. Es por ello que el ejemplo de análisis económico ejemplo, no se genera a nivel de árbol individual, sino a nivel de rodal tomando como referencia el dap medio. Los resultados se presentan en la siguiente sección.

Proyección de productos de árboles futuros

La proyección se realiza para evaluar el comportamiento del valor de la producción maderera cada un centímetro de incremento en diámetro, que en este caso de estudio corresponden a un período de dos años. La Figura 6 muestra la proyección de productos para el Rodal 1, que con un diámetro medio inicial de 34 cm tiene un volumen de 125,5 m³/ha en productos, de los cuales el 15% corresponde a producto aserrable de alto valor (P1), un 11% a trozas debobinables (P2), 56% a trozas cortas aserrables (P3), 16% a trozas pulpables (P4) y finalmente un 2% a leña.

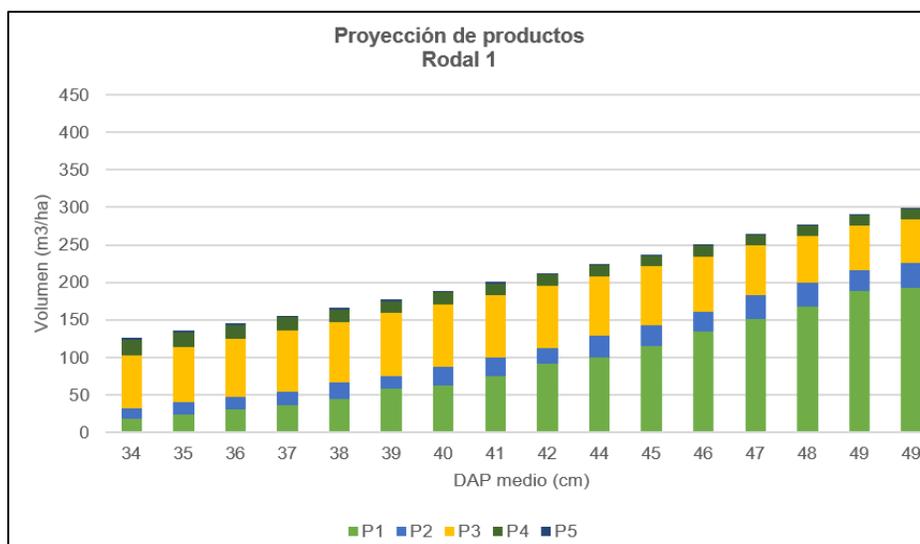


Figura 6. Proyección de productos para rodal 1 (P1= Troza aserrable de alto valor; P2= Troza debobinable; P3= Troza aserrable corta; P4= Troza pulpable; P5= Leña).

El Cuadro 3 muestra los resultados de proyección de valor para el Rodal 1. Esta tabla entrega la información de diámetro medio del rodal, el ingreso marginal del valor del bosque (árboles futuros) y el costo de oportunidad del capital (costo marginal) para tres tasas de interés (6, 4 y 2%).

Luego está la diferencia entre ingreso marginal y costo marginal, para evaluar las pérdidas y ganancias de mantener el bosque en pie frente al incremento de un centímetro en diámetro cada dos años.

En el Cuadro 3 se puede ver que para una tasa de interés del 6%, se evidencia que la máxima diferencia entre ingreso marginal y costo marginal se produce a un DAP medio de 38 cm con un valor de 48.352 \$/ha, sin embargo, hay que considerar que para llegar a ese valor máximo se tuvo una pérdida de 29.422 \$/ha en el diámetro de 37 cm.

Los resultados muestran que se podría esperar hasta los 39 cm de DAP, porque desde ese diámetro hacia arriba siempre el costo de oportunidad del capital es mayor que el ingreso marginal y se considera como parte de la decisión una pérdida puntual a los 37 cm de DAP.

Para el caso de la tasa de interés de 4%, la máxima diferencia también se produce en un DAP medio de 38 cm y es posible seguir esperando la decisión de corta durante todo el horizonte de proyección, porque el ingreso marginal es mayor que el costo marginal.

Sin embargo, se puede notar que en ciertos DAP medios de rodal se producen mayores ganancias (38, 39, 41, 42, 46 y 47 cm), información adicional que puede ser de utilidad para tomar la decisión de esperar para un mayor crecimiento o cortar el bosque.

Para la tasa de interés del 2%, el máximo valor se produce en el DAP medio de 46 cm, y durante todo el período de proyección el ingreso marginal siempre es mayor que el costo marginal, por lo tanto, el tomador de decisión a la tasa de interés de 2% puede esperar sin cortar el bosque.

Cuadro 3. Resultados de proyección del rodal 1.

Año	DAP medio (cm)	Ingreso Marginal (\$/ha)	Costo del capital (\$/ha)			Ingreso marginal – Costo del capital (\$/ha)		
			Interés 6%	Interés 4%	Interés 2%	Interés 6%	Interés 4%	Interés 2%
2020	34							
2022	35	241.652	201.377	132.948	65.822	40.274	108.703	175.829
2024	36	236.396	231.245	152.667	75.585	5.151	83.729	160.811
2026	37	231.042	260.464	171.957	85.135	-29.422	59.085	145.906
2028	38	337.372	289.021	190.810	94.470	48.352	146.562	242.903
2030	39	362.180	330.720	218.339	108.099	31.460	143.840	254.080
2032	40	288.160	375.485	247.893	122.731	-87.325	40.267	165.429
2034	41	371.503	411.102	271.407	134.373	-39.599	100.095	237.129
2036	42	446.576	457.020	301.722	149.382	-10.443	144.855	297.194
2038	44	396.925	512.217	338.162	167.424	-115.292	58.762	229.501
2040	45	447.874	561.276	370.551	183.459	-113.402	77.323	264.415
2042	46	539.756	616.634	407.098	201.553	-76.878	132.658	338.203
2044	47	558.980	683.348	451.142	223.360	-124.368	107.838	335.620
2046	48	514.957	752.437	496.755	245.942	-237.480	18.202	269.015
2048	49	558.464	816.086	538.775	266.747	-257.622	19.689	291.718

El rodal 2 entra a la proyección con un dap medio de 32 cm. Los resultados de la proyección de productos se pueden apreciar en la figura 7 y la proyección de volumen y valor en el Cuadro 4.

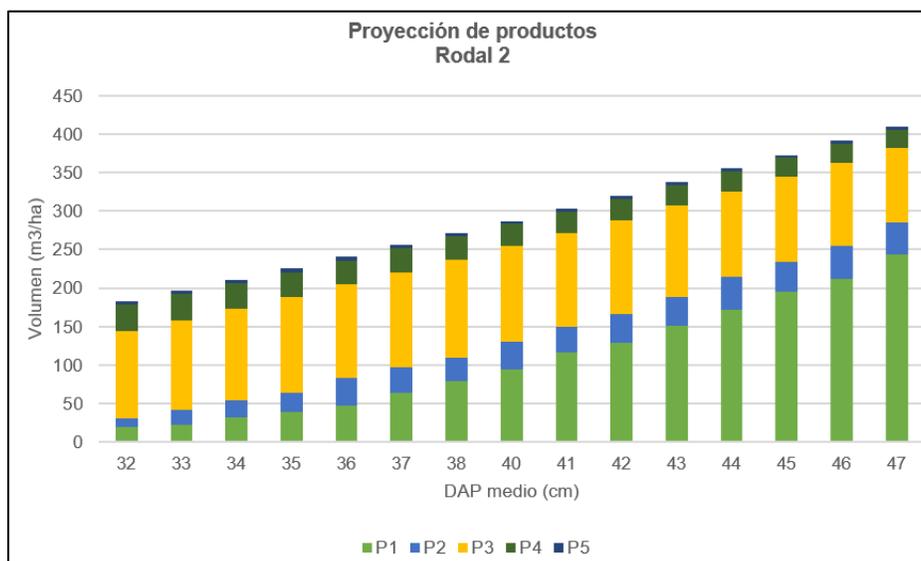


Figura 7. Proyección de productos para rodal 1 (P1= Troza aserrable de alto valor; P2= Troza debobinable; P3= Troza aserrable corta; P4= Trozas pulpable; P5= Leña)

Cuadro 4. Resultados de proyección de Rodal 2.

Año	DAP medio (cm)	Ingreso Marginal (\$/ha)	Costo del capital (\$/ha)			Ingreso marginal – Costo del capital (\$/ha)		
			Interés 6%	Interés 4%	Interés 2%	Interés 6%	Interés 4%	Interés 2%
2020	32							
2022	33	269.334	262.056	173.008	85.656	7.278	96.326	183.678
2024	34	381.662	295.345	194.985	96.537	86.317	186.677	285.125
2026	35	310.152	342.519	226.129	111.956	-32.367	84.023	198.196
2028	36	430.609	380.854	251.437	124.486	49.755	179.171	306.123
2030	37	481.158	434.077	286.575	141.883	47.081	194.582	339.275
2032	38	474.021	493.548	325.838	161.322	-19.527	148.183	312.699
2034	40	559.585	552.137	364.518	180.472	7.448	195.067	379.113
2036	41	622.788	621.302	410.180	203.079	1.486	212.608	419.709
2038	42	472.408	698.278	460.999	228.240	-225.871	11.408	244.168
2040	43	659.135	756.668	499.548	247.325	-97.533	159.588	411.810
2042	44	701.456	838.137	553.333	273.954	-136.681	148.123	427.502
2044	45	644.205	924.837	610.572	302.293	-280.632	33.633	341.912
2046	46	585.571	1.004.461	663.139	328.319	-418.889	-77.568	257.253
2048	47	882.851	1.076.837	710.922	351.976	-193.986	171.930	530.876

En el rodal 2 la máxima diferencia entre ingreso marginal y costo del capital se produce al alcanzar un DAP medio de 34 cm para una tasa de interés del 6%. Mientras que para una tasa de interés del 4% la máxima diferencia se produce a los 41 cm de DAP medio. Finalmente, para la tasa de interés del 2%, la máxima diferencia se produce a los 47 cm de DAP, en este caso al ser una tasa de interés tan baja, el incremento en valor es siempre superior al costo de oportunidad del capital durante todo el horizonte de proyección.

DISCUSIÓN

Muchas veces se usa el método del diámetro meta para sistemas de manejo multietáneo, tal como lo proponen también Toral *et al.* (2014) para renovales del tipo Roble-Raulí-Coigüe. A nivel de rodal y

cuando se planifica una cosecha con otros sistemas silvícolas, como la corta de protección o de árbol semillero, es necesario cosechar una gran cantidad de árboles al mismo tiempo y no es adecuado esperar que cada uno haya alcanzado un diámetro específico. Sin embargo, el presente estudio muestra que la proyección de valor que se realiza por árbol individual, también es aplicable al rodal completo, con pequeñas variaciones del momento óptimo para la cosecha.

Para la aplicación del presentado método, los parámetros de calidad maderera del fuste, cantidad de árboles futuro y una acertada proyección del crecimiento son decisivos para el resultado.

En este estudio la proyección de productos se realizó considerando que no habría restricción de calidad para la obtención de productos, más que el diámetro. En roble, que tiene fustes rectos, cilíndricos y con buena poda natural, existe una alta probabilidad de que este supuesto se cumpla. Solo en plantaciones o rodales muy malos podría haber restricciones a la calidad por ramas gruesas (Müller-Using *et al.*, 2020b). En caso que haya restricciones de calidad por una presencia frecuente del barrenador *Holopterus chilensis*, esto iría en perjuicio de la aplicabilidad de los resultados de este estudio. *Holopterus chilensis* afecta severamente la troza basal de estos árboles afectando entre el 40 y el 50% del volumen total del árbol, quedando inutilizable para producción de madera debobinable, chapa o aserrada y utilizándose sólo para astillas o combustible. La infestación es especialmente frecuente en la provincia de Valdivia, extendiéndose, sin embargo, a toda el área de distribución de la especie (Lanfranco *et al.*, 2014).

Un aspecto relevante para la producción maderera de roble es el proceso de duraminización, que según lo observado por los autores, comienza según sitio, a partir de un diámetro de 40-50 cm. A partir de estos diámetros se espera que al menos parte de la madera se encuentre en proceso de duraminización, lo que conduce a diferencias de color y durabilidad entre duramen y albura. Esto podría ser una desventaja al momento de comercializar. Sin embargo, con los diámetros meta definidos por este estudio, tal fenómeno no debería ocurrir con frecuencia.

Es muy importante conocer la cantidad adecuada de árboles futuro en el rodal para lograr un aprovechamiento completo del sitio. Para su definición resulta útil la herramienta Diagrama de Manejo de Densidad, que entrega el rango de densidad óptima de un rodal en relación a su diámetro medio cuadrático. En el caso de los rodales de roble aquí analizados, y para un diámetro de cosecha de 40 cm, el número mínimo de árboles al momento de la cosecha corresponde a 200 individuos por hectárea, para no subutilizar el sitio. Considerando el rango de densidad de alta productividad (Müller-Using *et al.*, 2012b) la cantidad de árboles sube a 300/ha. Esta es entonces la cantidad óptima de árboles futuro que el rodal debería presentar. En los rodales estudiados la cantidad de árboles futuro rodea los 200 árb/ha. Este es un aspecto de gran relevancia, ya que el método presentado sólo considera los árboles futuro en su análisis. Entre mayor es la diferencia entre los árboles requeridos para una ocupación completa de sitio y la disponibilidad de árboles con calidades que permitan definirlos como futuros, más grande es el aporte de otros árboles al valor del rodal. La falta de individuos de buena calidad es un índice de deficiencias en el manejo silvícola, dado que la especie roble por naturaleza tiende a fustes rectos y cilíndricos. Algunas de las causas pueden ser la intervención tardía, una muy baja densidad del rodal o prácticas de floreo.

Otro factor decisivo en el método presentado, es el crecimiento. Los valores de crecimiento considerados, son crecimientos reales encontrados en bosques manejados de forma comercial. Llama la atención, que a pesar del manejo y de haber seleccionado los rodales de mejor crecimiento, según el criterio de los propietarios y/o encargados de la silvicultura de las empresas forestales involucradas, difieren de los datos publicados como potencial de crecimiento de roble en el área de estudio (Donoso *et al.*, 1993; Grosse 2009). Según los resultados del análisis de crecimiento de los rodales de este estudio (Pilquinao *et al.*, 2020) esta diferencia puede deberse a que las primeras intervenciones se realizaron de forma tardía, ya habiendo pasado el período de mayor crecimiento de la especie, o que las intervenciones hubiesen sido de baja intensidad y no hayan podido crear las condiciones para una buena respuesta en crecimiento.

En cuanto al análisis económico, son de mucha relevancia para los resultados de este estudio los precios asignados a los productos. En relación a los precios considerados, se trata de los precios vigentes al momento de la evaluación. Existe cierta incertidumbre sobre cómo estos podrían cambiar en un futuro. Si se comparan con los precios de especies latifoliadas europeas, por ejemplo con haya (*Fagus sylvatica*), esta logra precios alrededor de un tercio más altos que el roble en Chile (Land und Forst, 2021).

Según diversos estudios, el rango de diámetros meta para roble oscila entre 35 y 60 cm (Müller-Using *et al.*, 2020b; Toral *et al.*, 2014; Grosse & Quiroz, 1999; Martin *et al.*, 2020). Basándose en el cálculo del máximo ingreso marginal, Toral *et al.* (2014) llegan a un diámetro de cosecha de 60 cm, pero no entregan los antecedentes del cálculo de valor. Müller-Using *et al.* (2020) consideran en una plantación de roble un diámetro meta medio de 50 cm, asegurando así que cada uno de los 148 árboles del rodal final entreguen al menos dos trozas de alta calidad. Por su parte, el Estudio de Disponibilidad de Madera de Roble, Raulí y Coigüe, indica que los medianos propietarios apuntan a diámetros objetivos de 40 cm (Martin *et al.*, 2020), lo que concuerda con el resultado de este estudio.

CONCLUSIONES

Generalmente la medida silvicultural aplicada a los renovales de roble (*Nothofagus obliqua*) en el centro sur de Chile es la definición de árboles futuro que están proyectados a llegar hasta el final de la rotación y que son liberados a través de raleos para su óptimo desarrollo y crecimiento. En este sentido es de relevancia conocer el incremento de valor de estos árboles en específico y contar con una metodología para definir un diámetro de cosecha que permita optimizar el ingreso esperado por venta de los productos madereros. Según el presente estudio, este diámetro varía entre 34 y 46 cm, según la tasa de rentabilidad esperada y la condición inicial del rodal, expresada en la distribución diamétrica de los árboles futuro. Entre más alta la rentabilidad esperada, más bajo es el diámetro meta.

REFERENCIAS

- Araya, L. (2011). Radiografía del Tipo Forestal Roble Raulí Coihue en Curacautín. CONAF Curacautín.
- DIPRES. (2021). http://www.dipres.gob.cl/597/articles-212553_doc_pdf1.pdf. Consulta: 14 diciembre, 2021.
- Donoso, P., Donoso, C. & Sandoval, V. (1993). Estudio de crecimiento de plantaciones y renovales manejados de especies nativas en el área andina de las provincias de Cautín y Valdivia. *Ciencia & Investigación Forestal*, 7 (2): 255-287. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1993.188>
- Duerr, W.A., Fedkiw, J. & Guttenberg, S. (1956). *Financial Maturity: A Guide to Profitable Timber Growing*. Washington, DC: U.S. Department of Agricultural . Tech. Bull., 1146. 74 p.
- Grosse, H. (Ed). (2009). *Silvicultura del bosque nativo chileno, función histórica y proyecciones futuras sobre la base de manejo sustentable*. Instituto Forestal. 136 p.
- Grosse, H. & Quiroz, I. (1999). Silvicultura de los Bosques de Segundo Crecimiento de Roble, Raulí y Coigüe en la Región Centro-Sur de Chile. En: Donoso, C. & Lara, A. (Eds). *Silvicultura de los Bosques Nativos de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago. Pp: 95-128.
- Kahler, C.G. (1993). Determinación de una función de ahusamiento para renovales de roble y raulí. *Ciencia & Investigación Forestal*, 7(1): 117-133. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1993.183>
- Land & Forst. (2021). https://www.landundforst.de/media/2021-06/Holzpreistabelle_Juni_2021.pdf. Consulta: 14 diciembre, 2021.
- Lanfranco, D., Alzamora, R., Ruiz, C. & Sandoval, V. (2014). *Medidas Silviculturales para Mejorar el Estado Sanitario en Renovales de Nothofagus en la Provincia de Valdivia*. Informe Final proyecto FIBN 006/2012. 75 p.
- Lara, A., Reyes, R. & Urrutia, R. (2010). *Bosques Nativos*. En: Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile 2008. Instituto de Asuntos Públicos. Centro de Análisis de Políticas Públicas. Universidad de Chile. Santiago. Pp: 126-171.
- Martin, M., Büchner, C., Sagardía, R., Bahamóndez, C., Rojas, Y., Guzmán, F., Barrientos, M. *et al.* (2020). Disponibilidad de madera nativa en renovales de Roble- Raulí- Coihue. Regiones de Ñuble a Los Ríos. INFOR
- MINAGRI. (2008). Ley N° 20283 Sobre recuperación del bosque nativo y fomento forestal. En: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=274894>. Consulta: 16 diciembre, 2021.
- Müller-Using, S., Müller-Using, B., Martin, M., Grosse, H. & Mujica, R. (2012). Estado actual y modelos silvícolas para los renovales de *Nothofagus* en la zona centro sur de Chile. Instituto Forestal. Valdivia, Chile. 32 p.

- Müller-Using B., Tiemann, M., Donoso, P. & Wolf, B. (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 & Investigación Forestal*, 26(1): 68-28. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.527>
- Müller-Using, S. (Ed). (2020b). El Manejo de Renovales de Roble-Raulí-Coigüe en una resumida mirada: Estadísticas e investigaciones en curso. Instituto Forestal. Documento de Divulgación N° 52. 60 p.
- Müller-Using, S., Martin, M. & Merino, R. (2012b). El diagrama de densidad de Gingrich como herramienta para la planificación de raleos en renovales del tipo roble-raulí-coigüe. Instituto Forestal. Documento Divulgativo N° 39. 15 p.
- Peralta, M. (1976). Uso, clasificación y conservación de suelos. Santiago, Ministerio de Agricultura. Servicio Agrícola y Ganadero. 337 p.
- Pilquinao, B., Martin, M., Müller-Using, S., Rojas, Y., Villalobos, E., Guiñez, R. & Barrientos, M. (2020). 30 años de manejo de renovales de roble: un análisis de la reacción en crecimiento y estructura. *Ciencia & Investigación Forestal*, 26(3): 7-32. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.535>
- SIMEF 2021 <https://simef.minagri.gob.cl/herramientas/reporte-estadistico-ver>. Consulta: 14 diciembre, 2021.
- Toral, M., González, L. & Navarro, R. (2014). Propuesta de manejo para el tipo forestal roble - raulí - coigüe bajo el método de selección. Corporación Nacional Forestal - Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. Santiago. 161 p.
- Thünen, J.H. (1826). *Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und National-Oekonomie*. Hamburg.
- Veblen, T.T., Donoso, C., Schlegel, F.M. & Escobar, B. (1981). Forest dynamics in south-central Chile. *Journal of Biogeography*, 8(3): 211-247. <https://doi.org/10.2307/2844678>



APUNTE

Antecedentes iniciales para la utilización de especies de *Salix* como biomasa para energía en la región de Aysén

Pinilla, Juan Carlos¹; Riquelme, Francisca²; Acuña, Bernardo².

¹ Instituto Forestal, Sede Biobío, Chile. jpinilla@infor.cl

² Instituto Forestal, Sede Coyhaique, Chile.

*Autor de correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.557>

Recibido: 10.12.2021; Aceptado 22.12.2021

RESUMEN

La utilización eficiente de la biomasa forestal en procesos de generación de energía es una de las líneas de trabajo del Instituto Forestal, caracterizando especies adaptadas a distintas situaciones de crecimiento y de una productividad que permitan su utilización en la generación de energía. Esto es particularmente importante para la comuna de Coyhaique, debido a la dependencia de la leña como fuente de calefacción y a la creciente necesidad de abastecimiento de biomasa para energía.

Se evaluó plantaciones experimentales de *Salix alba* y *S. cinerea* establecidos en la Región de Aysén, obteniendo antecedentes de crecimiento y biomasa, caracterización energética y de análisis elemental. Los resultados generales indican que, a los ocho años, *S. alba* desarrolló un mayor crecimiento en variables del árbol como en biomasa aérea, con un DAP medio de 4,7 cm y altura de 6,7 m, mientras que *S. cinerea* registró valores de 2,8 cm y 5,5 m para DAP y altura, respectivamente. En biomasa aérea verde, *S. alba* presentó un valor de 18 kg por árbol, mientras que *S. cinerea* registró 10,4 kg, con un valor de 41% para el peso seco en relación al peso verde de la biomasa. El Poder Calorífico Inferior fue de 18.009 y 18.163 J/g para *S. alba* y *S. cinerea*, respectivamente, y los valores del Análisis Elemental indican que es posible su utilización como materia prima para energía.

Se requiere de ampliar estos estudios en Coyhaique y contribuir a la oferta de biomasa para su uso en energía.

Palabras clave: Salix, Energía, Crecimiento, Diversificación, Biomasa

SUMMARY

The efficient use of forest biomass in energy generation processes is one of the Forestry Institute's lines of work, characterizing species adapted to different growth situations and a productivity that allows its use in energy generation. This is particularly important for the commune of Coyhaique, due to the dependence on firewood as a source of heating and the growing need to supply biomass for energy.

Therefore, *Salix alba* and *Salix cinerea* established in the Aysén Region were evaluated, obtaining growth and biomass antecedents, energy characterization and elemental analysis. The general results indicate that, at eight years, *Salix alba* developed greater growth in tree variables such as aerial biomass, with a mean DBH of 4.7 cm and height of 6.7 m, while *Salix cinerea* registered values 2.8 cm and 5.5 m for DBH and height, respectively. In green aerial biomass, *Salix alba* presented a value of 18 kg per tree, while *Salix cinerea* registered 10.4 kg, with a value of 41% for the dry weight in relation to the green weight of the biomass. The Lower Calorific Power was 18,009 and 18,163 J / g for *Salix alba* and *Salix cinerea*, respectively, and the Elemental Analysis values indicate that it is possible to use it as raw material for energy.

It is necessary to expand these studies in Coyhaique and contribute to the supply of biomass for use in energy.

Key words: Salix, Energy, Grow, Diversification, Biomass.

INTRODUCCIÓN

Ampliar y diversificar la matriz energética de Chile, promoviendo la generación de energía a partir de fuentes renovables no convencionales es uno de los objetivos estratégicos planteados por el Ministerio de Agricultura de Chile y acogido por el Instituto Forestal.

Entendiendo biomasa como toda materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía. La biomasa, particularmente de origen forestal, ha

permitido el desarrollo acelerado de tecnologías de recolección, transformación y combustión, estando ya en un nivel relativamente dominado.

En Chile la biomasa se emplea principalmente para la producción energía calórica (térmica) y energía eléctrica, ya sea mediante su uso como leña, astillas, pellet y en plantas de cogeneración que se abastecen de los residuos de los procesos industriales (licor negro, corteza, otros), consumiendo la energía que demanda el funcionamiento de su industria y vendiendo los excedentes al SIC (Sistema Interconectado Central), la red de distribución nacional.

Actualmente en el país existen diversas fuentes de biomasa leñosa para la generación de energía, principalmente proveniente del manejo y subproductos de la silvicultura (raleos, cosecha) así como también subproductos de la industria del aserrío y celulosa.

Un componente abordado en la investigación tecnológica forestal orientada a la búsqueda de alternativas energéticas en Chile, corresponde a la identificación de especies forestales que pueden ser utilizadas en generación de biomasa para energía, incluyendo en ello a las plantaciones Bioenergéticas.

Estas plantaciones se han considerado las más eficientes para el abastecimiento de plantas generadoras de energía a partir de biomasa y son ampliamente usadas en España, Estados Unidos, Inglaterra, Suecia, Nueva Zelanda, Alemania y Brasil para la generación de energía térmica y eléctrica. Su característica principal es que se establecen con especies forestales de rápido crecimiento y corta rotación.

Existen antecedentes acerca de las atractivas propiedades como combustible de *Acacia*, *Eucalyptus* y *Salix*, los cuales INFOR quiere validar según su adaptación y productividad como plantaciones dendroenergéticas en diferentes territorios en el país.

Estas plantaciones presentan densidades variables con rotaciones estimadas de 2 a 4 años. Se caracterizan por requerir medidas de silvicultura intensiva, control de competencia y fertilización. Un aspecto fundamental de esta propuesta en el país, es que deben establecerse en suelos no utilizables por la agricultura.

Otra premisa a considerar es la identificación de la especie más adecuada para cada sitio, los modelos de manejo más apropiados y las herramientas de gestión que apoyen el proceso. En este escenario se requiere de:

- Cuantificar y caracterizar los suelos forestales disponibles para establecer plantaciones dendroenergéticas,
- Utilizar e introducir al país especies dendroenergéticas de interés, como Acacias (*dealbata*, *melanoxylon*, *mearnsii*, *saligna* (IV Región)), Eucalipto (*nitens*, *camaldulensis*, *cladocalyx*, *sideroxylon*), y especies o variedades de *Salix*, entre otras.
- Identificar las mejores especies para los distintos sitios,
- Desarrollar modelos de gestión adecuados
- Caracterizar la biomasa obtenida y su productividad
- Evaluar aspectos de manejo y cosecha,
- Generar antecedentes de modelos de abastecimiento en coordinación con los demandantes del recurso dendroenergético, entre otros.

Adicionalmente, se requiere de una caracterización energética que debe considerar los siguientes análisis:

- % de Humedad,
- Poder Calorífico
- % de cenizas
- Densidades
- Requerimientos a cumplir (procesos y legislación).

La bioenergía representa, además, una valiosa alternativa para la mitigación del cambio climático global, siendo neutra en las emisiones de carbono frente a las importantes emisiones que generan combustibles como el petróleo, sus derivados y el carbón mineral, siendo una energía renovable y limpia.

Para acelerar la incorporación a la producción de especies dendroenergéticas es aconsejable estudiar a nivel nacional aquellas alternativas conocidas y probadas en el mundo.

Por otra parte, también es válido prospectar entre los recursos locales las especies con probada adaptación a las condiciones de sitio imperantes en el país, e identificar aquellas que presenten características compatibles con la producción de bioenergía.

Al respecto, las especies de *Salix*, son una interesante alternativa de producción dendroenergética en sitios específicos, ya que presentan un rápido crecimiento, que permitiría obtener biomasa en rotaciones cortas (3 a 5 años), y son especies que se adaptan a distintas situaciones edafoclimáticas en el país (Pinilla y Navarrete, 2010).

Junto con estudiar especies potenciales, es necesario conocer antecedentes acerca de su propagación, establecimiento, silvicultura, utilización y mejoramiento genético, entre otros. Este se correlaciona con los estudios de adaptación y rendimiento bajo diferentes sitios.

Este trabajo, actualmente en desarrollo, permite generar información focalizada en el fomento y utilización de la biomasa forestal para la generación de energía renovables, con el objetivo de apoyar el desarrollo; incrementar la productividad de los bosques en el país; diversificar la matriz energética nacional; y aportando, además, a la construcción de políticas públicas y el emprendimiento silvícola y tecnológico requeridos para los diferentes sectores involucrados.

En la Región de Aysén no existen antecedentes acerca de especies para su uso en energía, a excepción de algunos estudios realizados por INIA e INFOR con especies de álamos y sauces. Se requieren mayores antecedentes de las especies y de su manejo para el abastecimiento seguro de unidades de generación que requieran de biomasa para su funcionamiento.

En la búsqueda de opciones regionales para el suministro de biomasa para energía, se han iniciado estudios sobre las características de especies de *Salix* establecidas en el sector de Viviana Norte, comuna de Puerto Aysén, Región de Aysén, para obtener antecedentes de productividad y poder calorífico.

La introducción de híbridos y cultivares de *Salix* involucra ventajas económicas que mejoran la rentabilidad del negocio forestal como consecuencia de su rápido crecimiento y corta rotación. Además, incorporan ventajas sociales al brindar nuevas alternativas a los pequeños y medianos propietarios.

Lo anterior supone también ventajas ambientales debido a la función de protección de los árboles a suelos fluviales, inundados y erosionados, y a su aporte a la mitigación de problemas de contaminación (Riquelme *et al.*, 2019).

Atendiendo al interés y potencialidad de las especies del género *Salix* (sauces) para la Región de Aysén, en este artículo se da cuenta de los resultados obtenidos en la evaluación de un ensayo donde se prueban distintas especies de *Salix*.

Esta unidad, establecida en las cercanías de Coyhaique camino a Puerto Aysén fue medida y sus datos fueron sometidos a análisis para caracterizar el crecimiento y potencial energético de las especies. El objetivo es caracterizar la respuesta de dos clones de *Salix* mediante variables como, la supervivencia, altura, diámetros e indicadores de productividad y capacidad para su uso en energía.

MATERIAL Y MÉTODO

Área de Estudio

Se evaluó una experiencia de plantación de sauces correspondiente a una cortina cortaviento de 290 m de largo, establecida en el año 2013 con fines dendroenergéticos en el sector de Viviana Norte (VN), a 45 km al noreste de la ciudad de Coyhaique (45°23'1,7" S; 72°28'0,8" O), comuna de Puerto Aysén (Figura 1).

La cortina tiene un diseño de plantación en tres bolillos y un espaciamiento de 0,9 m entre hilera y 1,0 m sobre la hilera, en donde se estableció a modo de zona Buffer dos hileras con especies de sauce.

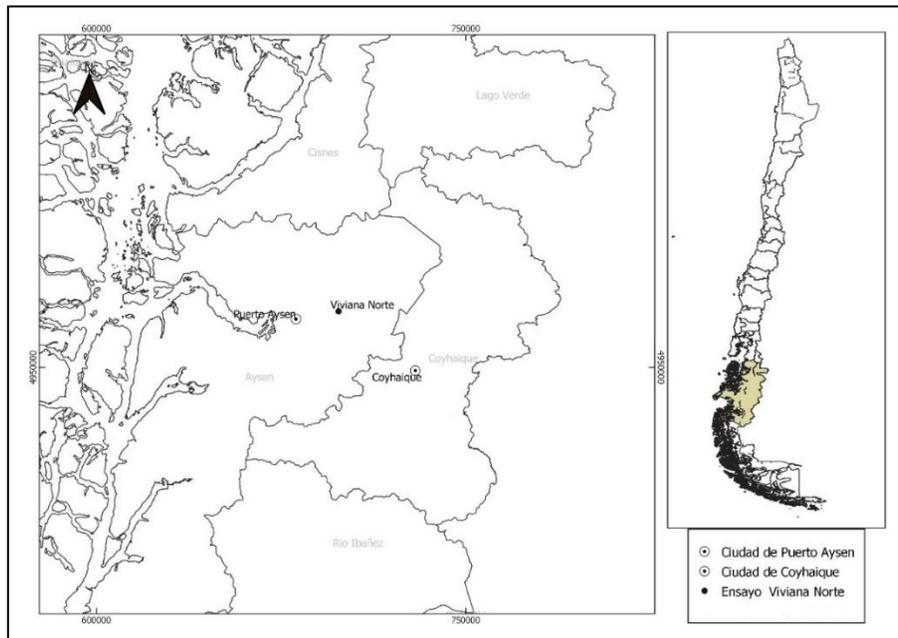


Figura 1. Ubicación sector del estudio



Figura 2. Vista sector con sauces seleccionados para el estudio

Según Riquelme *et al.* (2019) el sector presenta una vegetación predominante de bosque Siempreverde, y está dentro de la denominada Zona Húmeda de Aysén, con 2.640 mm anuales de precipitación (promedio 1960 - 2013). La temperatura media anual de la misma localidad es de 9°C, mientras que la máxima media llega a 12,8°C y la mínima media a 6°C.

El mes más cálido (enero) presenta una temperatura media de 13,6°C, con una máxima media de 17,9°C, y una mínima media de 6°C. El mes más frío (julio) tiene una temperatura media de 3,8°C, con una máxima media de 6,8°C y una mínima media de 1,6°C. La amplitud térmica media entre el mes más cálido y el más frío es de 9,8°C (Hepp y Stolpe, 2014).

El suelo es de drenaje imperfecto, textura franca, profundidades de hasta 88 cm y material parental de cenizas volcánicas (Stolpe y Hepp, 2014).

Especies utilizadas

-*Salix alba*

Árbol de hasta 25 m de altura; con hojas aserradas de color gris plateado, envés sedoso y tamaño aproximado de 5 x 12 cm. Sus flores tienen amentos en forma cilíndrica, que crecen en primavera. La corteza es de color grisáceo. Su madera es flexible y liviana; se utiliza para hacer cerillas, entre otros utensilios. Es especialmente adecuada para sitios con presencia de agua.

Las estacas de esta especie fueron obtenidas desde la zona de Coelemu, Región del Biobío.

-*Salix cinérea*

Arbusto de tamaño mediano con ramas gruesas; ocasionalmente árbol de 6 m de altura. Ramas jóvenes de color pardo grisáceo o pardo oscuro. Madera de las ramas de 2-4 años con numerosas costillas longitudinales, de hasta 2 cm de largo y 0,5 mm de altura. Hojas de hasta 12 cm de largo y 4,5 cm de ancho, ovadas u oblanceoladas, más anchas por encima de la mitad, inicialmente con pilosidad corta y tomento gris por ambas caras, más tarde glabras, de color verde grisáceo o verde oliváceo pardusco por el haz, verde azulado o verde grisáceo por el envés

Es una planta útil para consolidar suelos sueltos, taludes, bancos, taludes y para la reforestación de áreas húmedas no cultivadas. Debido a sus características es ideal en espacios pequeños, con presencia de agua.

Sus ramas se pueden usar para construir cabañas de caza también llamadas cestas. La corteza proporciona taninos y salicina. De esta última se obtiene el ácido salicílico, con acción tónica, antirreumática, febrífuga y astringente. Las hojas de los sauces actúan como cicatrizantes, astringentes y sedantes⁵.

Las estacas de esta especie fueron obtenidas desde la zona de Valdivia, Región de Los Ríos.



Figura 3. Sauces seleccionados para el estudio

Evaluaciones realizadas

La medición evaluada corresponde a la efectuada después de 8 años de establecidos los individuos en terreno.

⁵ <http://antropocene.it/es/2019/02/25/salix-cinerea/>

Para la caracterización del crecimiento se consideraron 5 árboles por variedad clonal, según distribución diamétrica. A partir de ellos se estimó los parámetros dasométricos, índice de productividad ($DAP^2 \cdot \text{altura}$) y antecedentes de peso verde.

La medición de los clones consideró el registro de las variables altura (H), diámetro de cuello (DAC) y número de vástagos por planta (NV). Las variables dasométricas H y DAC se midieron para cada vástago de las plantas evaluadas.

Luego de la medición se voltearon los árboles seleccionados, se trozaron y desramaron, de tal forma de poder pesarlos en terreno, obteniendo el dato del peso verde total de los individuos con una balanza (Figura 4).



Figura 4. Medición de altura de los sauces en la cortina cortavientos (a); Volteo de los sauces seleccionados (b); Pesaje de biomasa verde y registro de datos (c y d).

Posteriormente, para la estimación de la biomasa seca, se etiquetó y empaquetó el material según componente, árbol y especie para su traslado a dependencias de INFOR en Coyhaique, donde fueron dispuestas en un secador convencional a 103°C por 15 a 17 horas para bajar su contenido de humedad hasta obtener peso constante (figura 5).

Caracterización Biomasa

Muestras de biomasa de las dos especies de *Salix*, fueron enviadas a laboratorio para su caracterización de acuerdo a la Norma ISO 17225-2 Biocombustibles sólidos, Especificaciones de combustibles y clases.

Estas evaluaciones fueron efectuadas usando muestras de las mismas especies pero obtenidas el año anterior desde un banco clonal administrado por INFOR Coyhaique. Los análisis correspondieron a:

- Contenido de humedad
- Contenido de ceniza
- Poder Calorífico Superior e Inferior
- Análisis elemental (Carbono, Hidrógeno, Nitrógeno y Azufre)
- Determinación de Cloro

Los Análisis Elementales se efectuaron en Laboratorio de la Universidad de Concepción con un equipo Analizador Elemental marca Leco CHN 628 y 628 S, siguiendo protocolo del manual del equipo para medición en muestras sólidas y utilizando curva de calibración realizada con estándar EDTA para el módulo Carbono-Hidrógeno-Nitrógeno y Rice Flour para el módulo de Azufre⁶.



Figura 5. Secado en paquetes de clones de *Salix cinerea* y *Salix alba*

RESULTADOS

Los resultados de las mediciones de los árboles y del pesaje en verde de los componentes de la biomasa aéreas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados de sauces seleccionados y biomasa verde obtenida (8 años)

Especie	ID	DAP (cm)	Dac (cm)	Altura (m)	N° Fustes	Índice Productividad (cm ³)	Peso verde (Kg)		
							ramas – ramillas	tronco leñoso	Total individuo
<i>Salix alba</i>	A1	7,5	14,5	6,94	2	39.038	6,1	16,7	22,8
	A2	5,2	9,3	8,75	1	23.660	2,8	12,5	15,3
	A3	5,4	15,5	6,71	2	19.566	11,1	27,7	38,8
	A4	1,5	4,5	5,07	3	1.141	2,5	3,0	5,5
	A5	4,0	11,0	6,18	2	9.888	5,5	2,3	7,8
	Prom	4,7 a	11,0	6,73 a	2	18.659	5,6	12,4	18,0
<i>Salix cinerea</i>	C1	3,0	4,5	5,95	2	5.355	4,1	5,4	9,5
	C2	1,0	5,0	2,93	2	293	2,3	1,4	3,7
	C3	3,5	6,0	5,93	3	7.264	6,7	8,7	15,4
	C4	4,5	8,5	7,14	3	14.459	6,5	13,4	19,9
	C5	2,0	3,0	5,70	1	2.280	1,1	2,4	3,5
	Prom	2,8 a	5,4	5,53 a	2	5.930	4,1	6,3	10,4
Promedio General	3,8	8,2	6,13	2	12.294	4,9	9,4	14,2	

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Índice de productividad = $DAP^2 \times$ Altura

⁶ Informe de Ensayo Caracterización Biomasa RT-007-156. Informe de proyecto

Los resultados generales indican un mayor crecimiento de *Salix alba*, en altura DAP e índice de productividad (Cuadro 1), no obstante esta diferencias entre especie no son estadísticamente significativas.

La relación DAP-Altura por especie se presenta en la Figura 6. En el gráfico se puede apreciar una relación estable y creciente entre el valor del DAP (cm) y la altura (m) de los árboles.

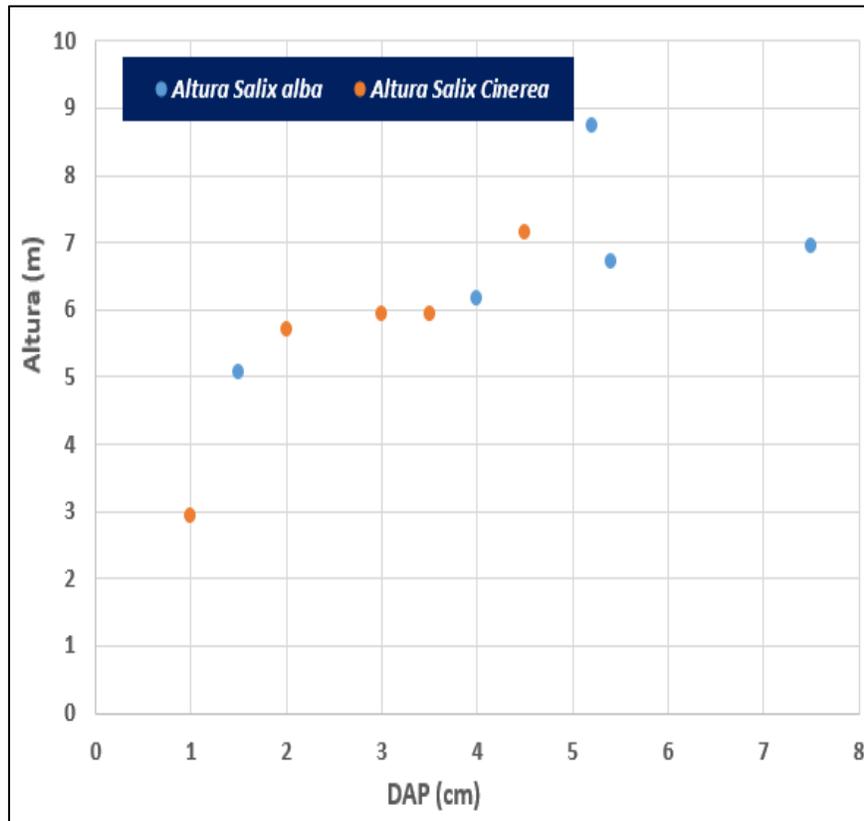


Figura 6. Relación DAP-Altura para *Salix cinerea* y *S. alba* a los 8 años de edad.

A partir de estos resultados se puede señalar que *Salix alba* presenta interesantes resultados, lo que sugiere que puede ser una especie para continuar su testeó en especial en zonas más húmedas como fuente de biomasa para energía en zonas similares a dónde está establecido.

Peso Verde de Biomasa Aérea

El mayor crecimiento en biomasa aérea lo presenta la variedad *S. alba*, con un peso verde promedio del árbol de 18 kilos, lo que llevado a la hectárea podría significar un total cercano a las 90 t/ha y una productividad media de 11,25 t/ha/año.

Lo anterior asumiendo un espaciamiento medio de 1 x 1 metros y una ocupación del 50% del sitio debido a los espacios requerido para las actividades mecanizadas.

Los árboles de *S. cinérea* presentaron una biomasa aérea verde con 10,4 kilos, lo que con los mismos supuestos anteriores significaría un total de 52 t/ha y 6,5 t/ha/año de crecimiento medio.

La figura 7 presenta la relación general entre el DAP y el peso verde aéreo de los árboles de ambas especies.

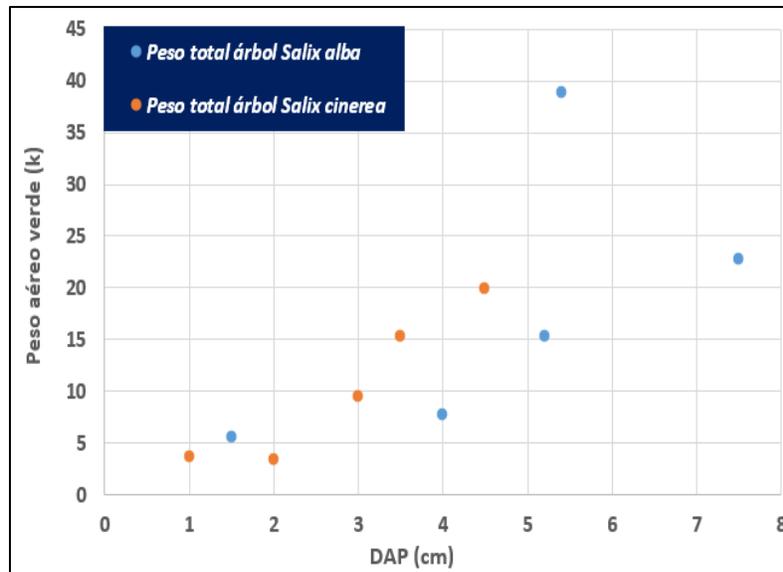


Figura 7. Relación DAP-Peso Verde en *Salix cinerea* y *S. alba* a los 8 años de edad.

La distribución porcentual de la biomasa total del árbol en los componentes ramillas, ramas y fuste se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Distribución porcentual de biomasa de árboles de *Salix cinerea* y *S. alba* a los 8 años de edad.

Especie	Peso verde				
	Total árbol	Ramas ramillas		Tronco leñoso	
	(Kg)	(Kg)	(%)	(Kg)	(%)
<i>Salix alba</i>	22,8	6,1	26,8	16,7	73,2
	15,3	2,8	18,3	12,5	81,7
	38,8	11,1	28,6	27,7	71,4
	5,5	2,5	45,5	3,0	54,5
	7,8	5,5	70,5	2,3	29,5
Prom	18,0	5,6	37,9	12,4	62,1%
<i>Salix cinerea</i>	9,5	4,1	43,2	5,4	56,8
	3,7	2,3	62,2	1,4	37,8
	15,4	6,7	43,5	8,7	56,5
	19,9	6,5	32,7	13,4	67,3
	3,5	1,1	31,4	2,4	68,6
Prom	10,4	4,1	42,6	6,3	57,4%
Promedio general	14,22	4,87	34,2	9,35	65,8

En el cuadro anterior se observa que en promedio un 34% del peso verde del árbol corresponde a ramas y ramillas, mientras que un 66% corresponde al fuste. En *S. alba* el 38% del peso verde aéreo corresponde a ramas o ramillas, mientras que el 62% corresponde al fuste. En el caso de *Salix cinérea*, aumenta la proporción de biomasa de ramas y ramillas a un 43%, y se reduce la del fuste a 57%.

La relación entre el dap de los árboles y la forma en que distribuyen su biomasa entre ramas-ramillas y fuste se grafica en la figura 8, observándose que a medida que aumenta el DAP, disminuye la componente de biomasa de ramas y ramillas y aumenta la participación de la biomasa correspondiente al fuste.

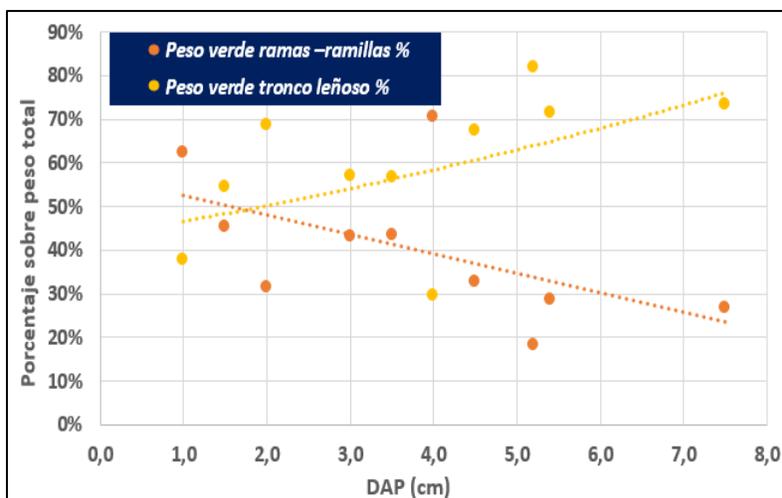


Figura 8. Distribución porcentual del peso verde de ramas-ramillas y fuste en función del diámetro de individuos de *Salix cinerea* y *S. alba* de 8 años de edad.

Peso Seco de Biomasa Aérea

En general el peso seco obtenido corresponde a un 41% del peso verde de la biomasa cosechada (Cuadro 3). En anteriores estudios con diferentes especies de *Salix* este porcentaje correspondió a aproximadamente un 55% (Pinilla y Navarrete, 2010).

Cuadro 3. Peso seco de ramas y ramillas de *Salix cinerea* y *S. alba* a la edad de 8 años.

ESPECIE	ID	DAP (cm)	Altura (m)	Peso Verde (Kg)	Peso Seco (Kg)	Peso Seco (%)
<i>Salix alba</i>	A1	7,5	6,94	6,10	2,57	42%
	A2	5,2	8,75	2,80	1,10	39%
	A3	5,4	6,71	11,10	4,73	43%
	A4	1,5	5,07	2,50	0,94	38%
	A5	4,0	6,18	5,50	2,18	40%
	Prom	4,7	6,70	5,60	2,30	40%
<i>Salix cinerea</i>	C1	3,0	5,95	4,10	1,92	47%
	C2	1,0	2,93	2,30	0,95	41%
	C3	3,5	5,93	6,70	2,91	43%
	C4	4,5	7,14	6,50	2,84	44%
	C5	2,0	5,70	1,10	0,38	34%
	Prom	2,8	5,50	4,14	1,80	42%
Promedio General		3,8	6,13	4,87	2,05	41%

La biomasa aérea seca de ramas y ramillas de *S. alba*, correspondiente a un 40% de la biomasa verde inicial. En el caso de *S. cinérea* este factor llegó a un 42%. Si esto se lleva a la hectárea utilizando los supuestos anteriores (espaciamiento medio de 1 x 1 metros y una ocupación del 50% del sitio), es posible estimar en 36 tMS/ha⁷, con un valor cercano a los 5 tMS/ha/año. En el caso de *Salix cinérea* ello representaría un valor de materia seca cercano a 22 t/ha y 3 tMS/ha/año de crecimiento medio.

Caracterización de la Biomasa

Los resultados de caracterización de la biomasa de *S. cinerea* y *S. alba* se resumen en el Cuadro 4 sobre la base de la materia seca.

⁷ tMS/ha, toneladas de materia seca por hectárea

Cuadro 4. Caracterización de la biomasa de ramas y ramillas de *Salix cinerea* y *S. alba* a la edad de 7 años.

Parámetro	Especies	
	<i>Salix alba</i>	<i>Salix Cinerea</i>
Contenido de Humedad (%)	50,38	51,47
Contenido en Cenizas (%)	1,40	2,91
Poder Calorífico Superior (J/g)	19.333	19.481
Poder Calorífico Inferior (J/g)	18.009	18.163
Carbono (%)	49,840	49,370
Hidrógeno (%)	6,075	6,054
Nitrógeno (%)	0,910	1,015
Azufre (%)	0,076	0,087
Cloro (%)	0,021	0,020

DISCUSIÓN

Para acelerar la incorporación de especies forestales al abastecimiento de biomasa para energía, es necesario estudiar a nivel nacional y local aquellas alternativas conocidas y probadas en el mundo, especialmente cuando estas cuentan con los antecedentes técnicos que las avalan y recomiendan para este uso. Por otra parte, también es válido prospectar entre los recursos locales en busca de especies con probada adaptación a las condiciones de sitio imperantes en el país, y tratar de identificar entre ellas a algunas que presenten características compatibles con la producción de bioenergía.

En términos generales *Salix alba* mostró una adecuada adaptación a una zona de alta disponibilidad hídrica (2.640 mm) y exhibe mejor desarrollo que *S. cinerea*. Presentó además un fuste recto, características que favorece su manejo, cosecha y utilización como biomasa para energía. En general las salicáceas provienen de zonas con inviernos fríos, algo rigurosos, por lo cual las bajas temperaturas del sector donde fueron establecidas no constituyen un factor climático limitante (Leonardis, 1960).

Las menores exigencias de clima y suelo *Salix alba*, junto con su plasticidad, le permiten obtener a los 8 años diámetros de 4,7 cm, alturas de 6,17 m e índices de productividad de 18.659 cm³. A nivel de árboles individuales esta especie registró valores de DAP de hasta 7,5 cm y altura de hasta 8,8 m. Como antecedente de referencia, Riquelme *et al.* (2019) señalan que en la misma zona el clon de álamo Unal a los siete años de edad presentó un diámetro de 5 cm, altura de 3 metros e Índices de Productividad de 8.311 cm³. En el mismo sentido Pinilla y Navarrete (2010) mencionan que *Salix alba* establecido en la zona de Cañete, Región del Biobío, presentó a los 3 años un DAC de 28,2 a 32,6 mm, una altura de 2,2 a 2,77 metros y un peso verde aéreo de 0,6 Kg; en el mismo sitio individuos de *Salix cinerea* registraron valores de 56 a 30 mm en DAC, 3,3 a 3,5 m de altura y 3,1 a 3,3 Kg de peso verde aéreo.

El Poder Calorífico incide en la cantidad de biocombustible para producir una unidad de energía. De ahí la importancia de contar con especies cuya biomasa entregue un alto valor de esta variable. Un mayor poder calorífico genera evidentemente una biomasa de mayor calidad energética. Al respecto, los resultados obtenidos indican valores de 19.333 y de 19.481 J/g para *S. alba* y *S. cinerea*, respectivamente. En términos de kilocalorías equivalen a 4,62 y 4,65 kcal/g. Como antecedente se señala que el poder calorífico determinado para maderas y cortezas de distintas procedencias de *Salix* varía entre 3,91 a 4,36 kcal/g (Durán, 1998), mientras que estudios realizados por INFOR con *Salix humboldtiana* indican 4,3 kcal/g (Pinilla y Navarrete, 2010). Otros antecedentes mencionados por Covacevich (1979) y Pinilla y Hernández (2010) para el poder calorífico superior de madera seca en horno de *Pinus radiata*, *Acacia caven*, *A. delbata* y *Eucalyptus globulus* entregan valores de 4,23 a 4,82 kcal/g.

Los resultados confirman la aptitud de las especies evaluadas para su uso en la generación de energía y son similares a lo reportado en otros países, tanto en materia seca como en poder calorífico, lo que permitiría generar una línea de investigación en torno a la silvicultura y utilización de *Salix* para el abastecimiento de biomasa para energía, en sitios adecuados para el desarrollo de estas especies, y especialmente en la zona de Coyhaique, de modo de participar de las respuestas para los desafíos que presenta la zona para la calefacción y generación de energía.

A partir de estos resultados *Salix alba* sería una especie adecuada para sectores con condiciones similares a Viviana Norte (Zona Húmeda de Aysén). A lo anterior se agrega la capacidad de rebrotar

desde tocón, lo que, unido a su rápido desarrollo, adaptabilidad y simple silvicultura, hace que *Salix* presente un alto potencial para su uso en energía en la Región de Aysén.

Especies de *Salix* se emplean en plantaciones comerciales de alto rendimiento, manejadas en monte bajo, principalmente en suelos agrícolas y húmedos, para el abastecimiento de biomasa para centrales energéticas locales de producción combinada de energía térmica y eléctrica. En tales plantaciones el cultivo del sauce está mecanizado desde la plantación hasta la cosecha. Pinilla *et al.* (2015) señalan que la producción aproximada de biomasa de sauce cultivado comercialmente en Suecia es de 6 a 12 t/ha/año, según las condiciones del terreno, agregando que, en Chile, con *S. viminalis* para producción de mimbre para cestería (Región de O'Higgins) se han obtenido rendimientos de hasta 12 tMS/ha/año.

La evaluación realizada en este estudio se considera adecuada para los objetivos de la investigación, ya que se trata de individuos jóvenes, en una edad que se estima indicada para una rotación con objetivos dendroenergéticos. Por otra parte, los valores registrados desde las especies de *Salix* corresponden a situaciones sin manejo ni mejora genética, por lo que la información constituye una línea base para ganancias a generar en volumen o biomasa mediante silvicultura, manejo y el uso del mejoramiento genético.

Los resultados también permitirán caracterizar la calidad de la biomasa generada en relación a su crecimiento según sitio, edad, manejo y atributos para su uso en energía. Conocer el crecimiento en diferentes condiciones, permitirá establecer esquemas silviculturales que permitan la producción sustentable de biomasa.

Todos estos resultados son iniciales y fundamentales para efectuar una selección más certera de las especies, árboles y esquemas silvícolas con mejor desempeño para producción de biomasa para energía en la Región de Aysén. Aún no es posible generar información sobre el desempeño de la especie en rodales uniformes, sin embargo, es factible estimar interesantes perspectivas para su uso en plantaciones, con regímenes de manejo intensivo en monte alto y posteriormente en monte bajo, con distintos períodos de rotación y con diferentes fines productivos, investigación que INFOR se propone iniciar en el corto plazo.

CONCLUSIONES

Se requiere estudiar e incorporar especies resistentes a las condiciones de sitio de Coyhaique, para diversificar la oferta regional de biomasa para energía, ya sea térmica, sanitaria o para electricidad. Este aspecto es especialmente relevante debido a la alta dependencia de la leña como fuente de calefacción, por la presión del bosque nativo para conseguir leña, por la creciente complejidad en el abastecimiento y por los problemas de polución ambiental derivados del mal uso de la misma.

Después de ocho años de crecimiento *Salix alba*, tanto en variables del árbol como en biomasa aérea, *Salix alba* alcanzó un DAP de 4,7 cm y una altura de 6,7 m, mientras que *S. cinerea* registró valores de 2,8 cm y 5,5 m para DAP y altura, respectivamente. En términos de biomasa aérea verde, *S. alba* presentó un valor medio de 18 Kg, mientras que *S. cinerea* registró un peso verde de 10,4 Kg; en promedio el 41% de esos valores corresponde a peso seco. En cuanto al Poder Calorífico Inferior, se obtuvo un resultado de 18.009 y 18.163 J/g para *Salix alba* y *Salix cinerea*, respectivamente, y valores del Análisis Elemental que permiten su utilización como materia prima para energía.

La adaptación y crecimiento de estas especies en las condiciones de suelo y clima del sector en estudio entrega un primer antecedente para la región, como un material adecuado y promisorio de testear en mayor profundidad.

La selección de una especie para su uso en energía permite generar escenarios con ventajas económicas que aporten a la rentabilidad del negocio forestal, derivado de su crecimiento en cortas rotaciones. Esto representa, además, ventajas sociales y ambientales para pequeños y medianos propietarios, los que podrían utilizar estos resultados para el establecimiento de bosques con diferentes objetivos, incluido el de abastecimiento de biomasa para energía.

Se requiere de ampliar este tipo de estudios en la zona de Coyhaique de modo de incrementar las alternativas de oferta de biomasa para su uso en energía y con ello, la selección de especies con mejor desempeño para producción de biomasa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los señores Jorge Bustamante (Investigador) y Exequiel Díaz (Técnico) de la sede Coyhaique de INFOR, por su apoyo y colaboración para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Covacevich, R. (1979). Poder Calorífico de Pino Insigne y de otras especies forestales chilenas. Universidad de Chile. Santiago.
- Durán, C. (1998). Caracterización de *Salix viminalis* acorde a su contenido de extraíbles y capacidad energética total. Editorial Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales
- Hepp, C. & Stolpe, N.B. (2014). Caracterización y propiedades de los suelos de la Patagonia Occidental (Aysén). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación INIA Tamel Aike, Coyhaique, Chile. 160 p.
- Leonardis, R. (1960). Silvicultura de las Salicáceas. Implantaciones de bosques comerciales. INTA. Pp: 193-206.
- Pinilla, J.C. & Hernández, G. (2010). Poder calorífico de *Acacia dealbata* Link crecida en Chile. Ciencia & Investigación Forestal, 16(3): 353-379. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2010.354>
- Pinilla, J.C. & Navarrete, M. (2010). Informe Técnico Proyecto 1: Desarrollo productivo de los bosques, de la industria forestal y fomento del uso de la madera. Promoción del uso dendroenergético de los productos forestales madereros, el caso de *Acacia dealbata* y *Salix sp.* Informe de proyecto Ministerio de Agricultura de Chile. Instituto Forestal, Sede Biobío. Concepción, Chile. 50 p
- Pinilla, J.C., Chung, P. & Navarrete, M. (2015). El Sauce chileno (*Salix humboldtiana* Willd) en la región del Biobío y su uso potencial en bosques plantados. INFOR, Informe Técnico N°202. Santiago. 44 p. <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/20998>
- Riquelme, F., Salinas, J., Gutiérrez, B. & Pinilla, J.C. (2019). Evaluación de ensayos de introducción de álamos en dos zonas Agroclimáticas de la Región de Aysén. Ciencia & Investigación Forestal, 25(3). 7-22. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2019.518>.
- Stolpe, N.B. & Hepp, C. (2014). Caracterización taxonómica de los suelos de los valles de interés agropecuario de la región de Aysén (Patagonia Occidental-Chile). Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación INIA Tamel Aike, Coyhaique, Aysén-Patagonia, Chile. 168 p.



OPINION

Integridad y multifuncionalidad: un modelo conceptual para hacer efectiva la restauración de los bosques nativos a gran escala.

Christian Little^{1,2*}, Bastienne Schlegel¹, Gerardo Vergara¹ & Mauro E. González^{2,3}

¹Instituto Forestal, Sede Los Ríos. Valdivia, Chile. clittle@infor.cl

²Center for climate and resilience Research (CR2). Santiago, Chile

³Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Universidad Austral de Chile

*Autor de correspondencia

DOI: <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.545>

Recibido: 05.11.2021; Aceptado 10.12.2021

RESUMEN

Se propone un modelo conceptual con un nuevo enfoque para las iniciativas que apoyen procesos de restauración de los bosques nativos. A partir del establecimiento de un ensayo de restauración a escala operativa, el modelo propone integrar variables de estado de los bosques con sus funciones ecológicas, esto con el objetivo de determinar niveles de integridad que apoyen la definición de los objetivos de la restauración y los indicadores de multifuncionalidad. Asociado al modelo, distinguimos una serie de barreras y oportunidades en los ámbitos ambientales, socio-económicos y de aprendizaje, presentando para cada uno de ellos un conjunto de recomendaciones que puedan aportar a la materialización de nuevas iniciativas de restauración de bosques nativos a gran escala en Chile. Concluimos sobre la importancia de estos nuevos enfoques y la necesidad de incluirlos como acompañamiento a la política pública y las decisiones del sector privado.

SUMMARY

A conceptual model directed towards new approaches that support native forest restoration processes is proposed. Based on the establishment of a restoration trial at an operational scale, the model proposes integrating variables of the state of forests with its ecological functions to determine levels of integrity that support the definition of restoration objectives and the indicators of forest multifunctionality. Associated with the model, we distinguish a series of barriers or opportunities in the environmental, socio-economic and learning fields, presenting for each of them a set of recommendations that can contribute to the achievement of new initiatives for the restoration of native forests on a large scale in Chile. We conclude on the importance of these new approaches and the need to include them as an accompaniment to public policy and private sector decisions.

INTRODUCCIÓN

El reconocimiento de una nueva época geológica, denominada Antropoceno (Lof *et al.*, 2019), en la que el ser humano ha sido precursor de fenómenos globales, tales como el cambio climático, es también una época en la que se ha alterado gran parte de los ecosistemas en el mundo, incluyendo transformaciones en los bosques naturales (Malhi *et al.*, 2014). Acciones antrópicas, tales como el cambio de uso de la tierra, la sobreexplotación de los bosques para la obtención de madera, así como formas menos visibles, como la ganadería, caza y la extracción de leña y carbón, han alentado a los países a suscribir numerosos acuerdos internacionales⁸ para frenar e incluso revertir los impactos de dichas acciones sobre los ecosistemas (Mekhlouf, 2021).

La reducción de beneficios para la sociedad, derivada de los impactos previamente señalados, ha sido el principal argumento para iniciar procesos de restauración (Mast *et al.*, 1999; Fiedler, 2000; Arno y Fiedler, 2005) que recuperen la estructura y composición histórica, así como la función ecológica de los ecosistemas. En el caso de los bosques nativos en Chile, la pérdida y fragmentación de los mismos

⁸ Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques (REDD +), la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible, así como metas en iniciativas de restauración global, incluido el Desafío de Bonn y la Declaración de Nueva York sobre los Bosques, que buscan restaurar 350 millones de hectáreas de tierras deforestadas y degradadas del mundo, así como reducir las emisiones de carbono para 2030.

(Miranda *et al.*, 2016; Vergara *et al.*, 2019), junto con cambios en los regímenes de incendios (Sarricolea & Úbeda, 2016; Gonzalez *et al.*, 2018; González *et al.*, 2020) o hidrológicos (Álvarez *et al.*, 2020), se constituyen en importantes elementos que afectan la resiliencia de estos ecosistemas, y proyectan serias incertidumbres sobre los efectos en el largo plazo (Reyer *et al.*, 2015).

La degradación de los bosques por presiones antrópicas y sus consecuentes efectos negativos en su funcionamiento y generación de servicios ecosistémicos (Vergara *et al.*, 2019), hacen que preguntas tales como: ¿Cuál es el grado de daño o deterioro?, ¿a qué nivel el daño ha afectado y afectará los distintos componentes y procesos ecológicos?, ¿cómo será la estructura y composición en el mediano y largo plazo?, o ¿qué beneficios se deberán promover a largo plazo, considerando las cambiantes condiciones ambientales y sociales?, aún no tengan una respuesta clara para orientar las actividades de manejo y conservación, así como las acciones y políticas efectivas para la restauración de bosques a múltiples escalas.

INTEGRIDAD Y MULTIFUNCIONALIDAD DE LOS BOSQUES NATIVOS

De acuerdo a Parrish *et al.* (2003), la integridad es esencialmente el grado en que un sistema está libre de modificaciones significativas en cuanto a estructura, composición y funciones. Si bien este concepto ha recibido menos atención que otros directamente asociados a los beneficios para el ser humano que se derivan de los bosques (ej., servicios ecosistémicos (Bishop & Landell-Mills, 2002; Brockerhoff *et al.*, 2017), resulta ser un concepto clave para entender e identificar el nivel de daño o alteración del bosque, así como sus objetivos de multifuncionalidad, entendidos como la habilidad de los ecosistemas para proveer simultáneamente múltiples bienes y servicios (Manning *et al.*, 2018).

En términos generales, un bosque con un bajo nivel de degradación (sin una alteración antrópica significativa), es decir, con una alta integridad, brindaría niveles más altos de beneficios, como el secuestro y almacenamiento de carbono, provisión de agua, uso forestal tradicional, contribución a los procesos climáticos locales y regionales y biodiversidad (Grantham *et al.*, 2020). Sin embargo, para bosques dañados o alterados del mismo tipo, desconocer el grado de deterioro es una limitante, tanto para evaluar las propiedades físicas del ecosistema, como para lograr acuerdos respecto a qué se está perdiendo y qué es lo que se requiere recuperar a través de la restauración (Putz & Redford, 2010). Es decir, qué se desea restaurar y para qué.

Tradicionalmente se considera la utilización de un ecosistema histórico para definir los objetivos y establecer una referencia, sin embargo, este enfoque está siendo reevaluado debido a las condiciones impuestas por el Antropoceno (Lof *et al.*, 2019), siendo la multifuncionalidad el concepto que podría permitir orientar el manejo hacia la integración de las demandas sociales (Borras *et al.*, 2016). De esta manera, considerando que la restauración se concibe como una actividad intencional que asiste o acelera la recuperación de un ecosistema respecto de su integridad y sostenibilidad (Gann *et al.*, 2019), resulta entonces clave identificar cuáles son los objetivos que persigue la restauración, tanto para evaluar la respuesta del ecosistema, como para establecer los beneficios que de él se obtengan en el tiempo.

A partir de una experiencia práctica de restauración en bosques nativos adultos⁹, presentamos el siguiente modelo conceptual que integra las variables de estado que caracterizan la composición y estructura del bosque con las funciones ecológicas (Figura 1), a partir de las cuales es posible definir los objetivos que persigue la restauración y los indicadores de multifuncionalidad (Cuadro 1). Así, a las variables de estado que representan el espacio discreto entre todos los posibles estados y su trayectoria en el tiempo (Figura 1a), sería posible distinguir niveles de integridad a partir de la valoración actual y potencial de las funciones demandadas del bosque (Figura 1b), permitiendo a la vez compensaciones entre beneficios y funciones divergentes durante el proceso de restauración. Así mismo, tanto las variables de estado, como la funcionalidad ecológica pueden ser monitoreadas en el tiempo para el logro de acuerdos en cuanto a los beneficios que deben priorizarse.

⁹ Ensayo de restauración a escala operativa bajo convenio INFOR-FORESTAL S.A. Ensayo desarrollado para bosques adultos del tipo forestal Coigüe-Raulí-Tepa ubicado en la comuna de Panguipulli. Se proyecta la restauración de 27 hectáreas.

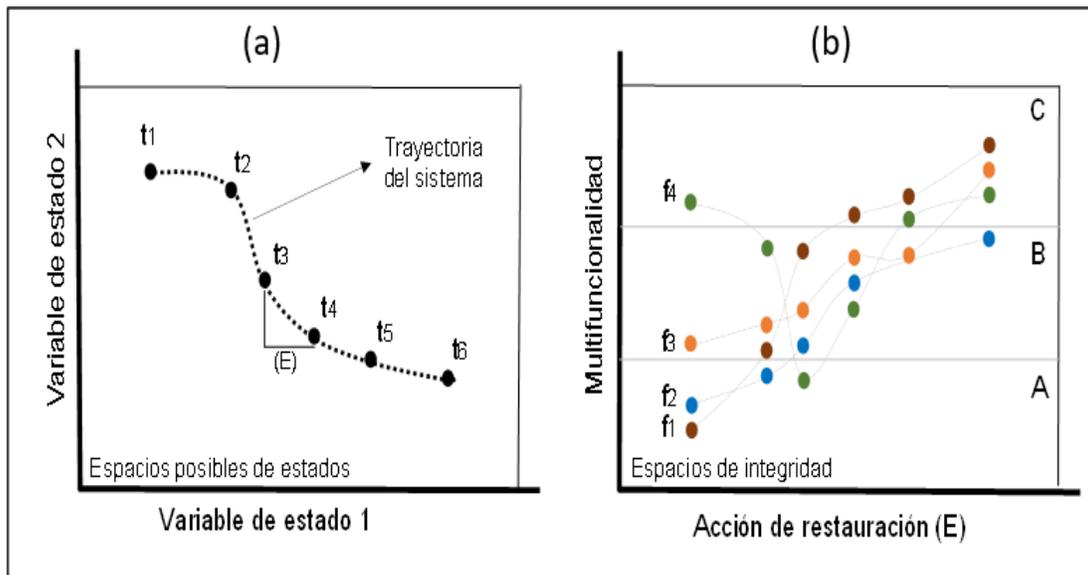


Figura 1. a) Espacio posible de estados respecto a variables de composición y estructura del bosque que cambian en el tiempo como consecuencia de acciones de restauración que implican incorporación de energía (E). Variables de estado, puede ser la relación de número de árboles por hectárea y el área basal. b) Niveles de integridad (A, B y C) respecto a la identificación de las funciones (f) del ecosistema identificadas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Función ecológica, ejemplo de objetivos de restauración e indicadores de multifuncionalidad.

Función ecológica	Objetivo de restauración (bienes y servicios)	Indicador(es) de multifuncionalidad
Provisión (f1)	Madera de calidad	Presencia y abundancia de especies de alto valor de acuerdo al potencial de sitio.
Información (f2)	Investigación y educación	Acciones de monitoreo y difusión de la ciencia.
Soporte (f3)	Diversidad de especies	Abundancia de especies vegetales y nichos.
Regulación (f4)	Secuestro de carbono	Tasa de crecimiento del bosque.

Para poner en marcha este modelo propuesto, en el Cuadro 2 se identifican los principales desafíos/oportunidades asociadas a los objetivos de restauración, los cuales abarcan los componentes ambientales, socio-económicos y de aprendizaje, que permitan hacer efectiva la restauración (Lara *et al.*, 2014).

Para cada desafío/oportunidad, presentamos un conjunto de recomendaciones orientado a la recuperación de la multifuncionalidad de los bosques, convirtiendo a la restauración en una oportunidad para incrementar la eficiencia de las acciones según decisiones guiadas por intereses y expectativas asociadas al suministro de bienes y servicios ecosistémicos.

Cuadro 2. Principales promotores para iniciar procesos de restauración de bosques nativos sometidos a procesos de degradación y recomendaciones a ser implementadas. Para cada promotor se presenta los desafíos/amenazas (A) y oportunidades para la restauración (B)

Componentes ambientales	
Promotores de Restauración	Recomendaciones
<p>Degradación Forestal.</p> <p>(A) Se estima que aproximadamente 450.000 hectáreas de bosques nativos del centro sur de Chile podrían estar en una condición de bosques degradados (Bahamondez & Thompson, 2016). Además, se desconoce la superficie de bosques nativos en proceso de degradación forestal (Vergara <i>et al.</i>, 2019).</p> <p>(B) Se considera a la restauración de bosque nativo como un componente clave de la Política Forestal de Chile 2015-2035 y el cumplimiento de los compromisos internacionales en materia de conservación de la biodiversidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar métricas que permitan evaluar la integridad y multifuncionalidad de los bosques nativos acordes al potencial de sitio. - Entender la relación de la integridad y multifuncionalidad con la provisión de bienes, servicios ecosistémicos y la biodiversidad. - Identificar prioridades de restauración en base a la integridad y multifuncionalidad de los bosques nativos para la recuperación de beneficios ambientales y sociales.
<p>Cambio Climático.</p> <p>(A) Las predicciones de cambio climático para en el centro-sur de Chile proyectan reducciones de precipitaciones y aumento de temperaturas (Boisier <i>et al.</i>, 2016).</p> <p>(B) Se considera a la restauración de bosque nativo como un componente clave de la Estrategia Nacional de Cambio Climático.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Incorporar los avances conceptuales en las leyes y normas en materia de mitigación y adaptación al cambio climático. - Incorporar los conceptos de degradación y restauración en los instrumentos de política forestal y ambiental. - Proporcionar información a tomadores de decisión local y partes interesadas respecto a la integridad y multifuncionalidad de los bosques nativos.
Componentes Socio-Económicos	
Promotores de Restauración	Recomendaciones
<p>Empleo para economías regionales y locales en sectores rurales.</p> <p>(A) Necesidad de incrementar la efectividad en aplicación de los incentivos del Estado para el manejo y recuperación del bosque nativo (Schlegel <i>et al.</i>, 2020).</p> <p>(B) Creciente interés privado en recuperar y manejar bosques nativos en sitios de alta productividad. Interés público (Ministerio del Medio Ambiente y la Corporación Nacional Forestal) en la identificación, priorización y mapeo de áreas clave de restauración como una actividad que aporte a la economía regional y local (Altamirano <i>et al.</i>, 2007). Interés público y privado para el establecimiento y promoción de programas de la producción de plantas de especies nativas y establecimiento de especies nativas con fines multipropósito (Bannister <i>et al.</i>, 2018; Schlegel <i>et al.</i>, 2020). Además, se busca establecer una política y planes para la restauración a gran escala (Bannister <i>et al.</i>, 2018) para cumplir con el compromiso del país de recuperar 500.000 hectáreas de bosques propuestas por los objetivos de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adecuar la Ley 20.283 para incorporar subsidios específicos dirigidos a la restauración de bosques nativos con objetivos multifuncionales definidos. - Modificar planes de manejo acordes a la determinación de la integridad del bosques y objetivos multifuncionales definidos. - Generar bases de datos y protocolos públicos y compartidos de desempeño inicial, crecimiento y productividad de los bosques. - Identificar bosques remanentes locales para suministrar material genético para la propagación de plantas e incentivos asociados al uso de material genético local de especies nativas. - Generar protocolos para la colecta de semilla y producción de plantas y disponer de información pública respecto a las labores silviculturales asociadas a desempeño de plántulas en la fase de establecimiento.
<p>Mercado de Servicios Ecosistémicos.</p> <p>(A) Inexistencia de programas del Estado asociados a mecanismos de compensación ambiental relacionados a la oferta y demanda de servicios ecosistémicos de los bosques nativos (Little y Lara, 2014).</p> <p>(B). Inicio de proyecto +Bosques (FAO-CONAF) enfocado al mercado del carbono y proyecto (MMA-GEF) enfocado a generar mecanismos de retribución económica por el servicio ecosistémico provisión de agua y conservación de la biodiversidad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Implementar programas de retribución ambiental en bosques con objetivos multifuncionales. - Determinar los costos e ingresos de faenas silvícolas a escala operativa asociadas a la restauración de bosques nativos con distinto grado de alteración y objetivos de multifuncionalidad.

Componentes Aprendizaje	
Promotores de Restauración	Recomendaciones
<p>Formación/Investigación.</p> <p>(A) carencia de personal capacitado en diferentes niveles de formación (profesionales, practicantes, capataces, operarios) para realizar la restauración atendiendo a sus diversos componentes.</p> <p>(B) Existencia de cursos de restauración en los planes de estudio tanto de carreras de pregrado (ej. Forestal, Conservación de Recursos Naturales), como a nivel de postgrado. Creciente interés de varias instituciones por ofrecer programas de formación en restauración. Universidades y centros de investigación dedicados a la investigación de ecología de la restauración, ecología del paisaje, entre otros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Incrementar el nivel de conocimiento e información sobre la respuesta de los ecosistemas, costos y beneficios asociados con las diferentes opciones de restauración incluyendo sus diferentes componentes. - Desarrollar áreas con fines demostrativos
<p>Cambios Culturales.</p> <p>(A) Necesidad de aportar a la comprensión social acerca de la importancia de la restauración para recuperar ecosistemas dañados o destruidos e información de aprendizaje de la restauración hacia la sociedad.</p> <p>(B) Rápido cambio cultural en las nuevas generaciones con mayor sensibilidad hacia los temas ambientales e interés en involucrarse en acciones relacionadas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Potenciar programas de divulgación, comunicación y difusión dirigidos a diferentes públicos y a la sociedad en general. - Promover y organizar programas de voluntariado para colaborar con proyectos y programas de restauración.

CONCLUSIONES

En los últimos 50 años ha habido notables avances respecto del conocimiento sobre ecología y dinámica de bosques nativos en Chile, así como los beneficios sociales que representan estos ecosistemas para el bienestar humano. Sin embargo, la huella asociada al uso histórico de los bosques, representa una barrera para su conservación y manejo en aquellas áreas donde los bosques han sobrepasado umbrales de cambio hacia condiciones menos favorables, y requieren de atención por parte del Estado debido a su importancia ecológica, productiva o social.

El enfoque de integridad y multifuncionalidad de los bosques nativos representaría una oportunidad para identificar los objetivos de manejo y las métricas para su monitoreo en el tiempo. Este enfoque permitiría incorporar valores intangibles del bosque, considerado un recurso renovable en cuanto la tasa de crecimiento y mantención de funciones ecológicas sean acordes a la escala temporal asociada a la demanda por beneficios (Schlegel, 2020).

El enfoque de la integridad y multifuncionalidad, basado en la teoría y experiencia práctica actual, podría ser incorporado en el desarrollo de políticas públicas, como por ejemplo la Ley de Bosque Nativo, o las decisiones del sector privado, en reconocimiento al valor ecológico y social de éstos, haciendo efectiva la restauración a gran escala.

REFERENCIAS

- Altamirano, A., Echeverría, C. & Lara, A. (2007). Efecto de la fragmentación forestal sobre la estructura vegetacional de las poblaciones amenazadas de *Legrandia concinna* (Myrtaceae) del centro-sur de Chile. Revista Chilena de Historia Natural, 80. Pp: 27-42. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2007000100003>
- Alvarez-Garretón, C. Boisier, J.P., Garreaud, R., Seibert, J. & Vis, M. (2020). Progressive water deficits during multi-year droughts in central-south Chile. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., Pp: 1-23. <https://doi.org/10.5194/hess-2020-249>
- Arno, S.F. & Fiedler, C.E. (2005). Mimicking Nature's fire: Restoring fire-prone forests in the West. Island Press, Washington, DC.
- Bahamondez, C. & Thompson, I.D. (2016). Determining forest degradation, ecosystem state and resilience using a standard stand stocking measurement diagram: theory into practice. Forestry, 89(3): 290-300. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv052>

- Bannister, J.R., Vargas-Gaete, R., Ovalle, J.F., Acevedo, M., Fuentes-Ramirez, A., Donoso, P.J., Promis, A. *et al.* (2018). Major bottlenecks for the restoration of natural forests in Chile. *Restoration Ecology*, 26. Pp: 1039-1104. <https://doi.org/10.1111/rec.12880>
- Bishop, J. & Landell-Mills, N. (2002) Forest environmental services: an overview. In: Pagiola, S., Bishop, J. & Landell-Mills, N. (Eds). *Selling Forest Environmental Services: Market-Based Mechanisms for Conservation and Development*. Earthscan Publications. London. Pp: 15-35.
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent mega-drought in central Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 43(1): 413-421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>.
- Borrass L., Kleinschmit D. & Winkel G. (2016). The “German model” of integrative multifunctional forest management—Analysing the emergence and political evolution of a forest management concept. *Forest Policy and Economics*, 77. Pp: 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.06.028>
- Brockerhoff, E.G., Barbaro, L., Castagneyrol, B., Forrester, D.I., Gardiner, B., González-Olabarria, J.R., Lyver, P.O.B. *et al.* (2017). Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. *Biodivers. Conserv.*, 26. Pp: 3005-3035. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1453-2>
- Fiedler, C.E. (2000). Restoration treatments promote growth and reduce mortality of old-growth ponderosa pine (Montana). *Ecol. Restoration*, 18. Pp: 117–119.
- González, M.E., Gómez-González, S., Lara, A., Garreaud, R. & Díaz-Hormazábal, I. (2018). The 2010-2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(89): e02300. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2300>
- González, M.E., Sapiains, R., Gómez-González, S., Garreaud, R., Miranda, A., Galleguillos, M., Jacques, M. *et al.* (2020). Incendios forestales en Chile: causas, impactos y resiliencia. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Universidad de Chile, Universidad de Concepción y Universidad Austral de Chile.
- Grantham, H.S., Duncan, A. & Watson, E.M. (2020). Anthropogenic modification of forests means only 40% of remaining forests have high ecosystem integrity. *Nat. Commun.*, 11. Art. N° 5978. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19493-3>
- Gann, G.D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C.R., Jonson, J., Hallett, J.G. *et al.* (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. 2nd edition. *Restoration Ecology*, 27. Pp: S1-S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- Lara, A., Little, C., Cortés, M., Cruz, E., González, M., Echeverría, C., Suarez, J. *et al.* (2014). Restauración de ecosistemas forestales. En: Donoso, C., González, M.E. & Lara, A. (Eds). *Ecología Forestal: Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile*. Ediciones Universidad Austral de Chile. Valdivia. 720 p.
- Little, C. & Lara, A. (2014). Servicios Ecosistémicos de los Bosques Nativos del Centro Sur de Chile. En: Donoso, C., González, M.E. & Lara, A. (Eds). *Ecología Forestal: Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile*. Ediciones Universidad Austral de Chile. Valdivia. 720 p.
- Löf, M., Madsen, P., Metslaid, M., Witzell, J. & Jacobs, D.F. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests*, 50. Pp: 139-151. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09713-0>
- Malhi, Y., Gardner, T.A., Goldsmith, G.R. Silman, M.R. & Zelazowski, P. (2014). Tropical Forests in the Anthropocene. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 39. Pp: 125-159. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-030713-155141>
- Manning, P., van der Plas, F., Soliveres, S., Allan, E., Maestre, F. T., Mace, G., Whittingham, M. *et al.* (2018). Redefining ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, 2. Pp: 427–436. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0461-7>
- Mast, J.N., Fulé, P.Z., Moore, M.M., Covington, W.W. & Waltz, A.E.M. (1999). Restoration of presettlement age structure of an Arizona ponderosa pine forest. *Ecological Applications*, 9. Pp: 228-239. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1999\)009\[0228:ROPASO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1999)009[0228:ROPASO]2.0.CO;2)
- Mekhlouf, O. (2021). International Legal protection of forest in the context of sustainable development. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 779 012131. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/779/1/012131>
- Miranda, A. Altamirano, A., Cayuela, L., Lara, A. & González, M.E. (2016). Native forest loss in the Chilean biodiversity hotspot: revealing the evidence. *Regional Environmental Change*, 17. Pp: 285-297. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-1010-7>

- Parrish, J.D., Braun, D.P. & Unnasch, R.S. (2003). Are we conserving what we say we are? Measuring ecological integrity within protected areas. *BioScience*, 53. Pp: 851-860. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0851:AWCWWS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0851:AWCWWS]2.0.CO;2)
- Putz, F.E. & Redford, K.H. (2010). The Importance of Defining 'Forest': Tropical Forest Degradation, Deforestation, Long-Term Phase Shifts, and Further Transitions. *Biotropica*, 42. Pp: 10-20. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00567.x>
- Reyer, C.P., Rammig, A., Brouwers, N. & Langerwisch, F. (2015). Forest resilience, tipping points and global change processes. *J. Ecol.*, 103. Pp: 1-4. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12342>
- Schlegel, B., Little, C., Urrutia, M., Hernández, G. & Pasten, R. (2020). Incorporando la multifuncionalidad en la evaluación económica de proyectos de restauración de bosques nativos siempreverdes en el sur de Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 26(1): 23-40. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.525>
- Sarricolea, P. Úbeda, X. (2016). Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change*, 146. Pp: 152-161. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.004>
- Vergara, G., Schlegel, B., Little, C., Mujica, R. & Martin, M. (2019). ¿Degradación o Degradado? Necesidad de una Propuesta Conceptual para Recuperar la Funcionalidad y Capacidad Productiva de los Bosques. *Ciencia & Investigación Forestal*, 25(1): 69-79. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2019.511>

CIENCIA & INVESTIGACIÓN FORESTAL

