



40^{AÑOS} Jornadas Forestales de Entre Ríos





40^{AÑOS} Jornadas Forestales
de Entre Ríos

ACTAS

DISERTACIONES Y RESÚMENES EXTENDIDOS

24 y 25 de septiembre de 2026
Concordia, Entre Ríos



Estación Experimental
Agropecuaria Concordia





40^{AÑOS} Jornadas Forestales de Entre Ríos

ORGANIZAN



Estación Experimental
Agropecuaria Concordia



COLABORAN



Asociación Forestal Argentina
REGIONAL ENTRE RÍOS



40^{AÑOS} Jornadas Forestales de Entre Ríos

PATROCINAN



CORRIENTES

Ministerio de Producción
Secretaría de Desarrollo Foresto Industrial
Dirección de Recursos Forestales





40^{AÑOS} Jornadas Forestales de Entre Ríos

AUSPICIAN





COMISIÓN ORGANIZADORA

EEA Concordia-INTA: Ciro Mastrandrea, Matías S. Martínez, María de los Ángeles García, Leonel Harrand, Carla S. Salto, Carlos de la Peña, Natalia Tesón, Sergio Ramos, Diego Moledo, Wilfredo Moledo, Dario Kaemena, Jorge Alejandro, Marcelo Pralong y Raúl Mendieta.

AIANER: Paola Velázquez, Paula Dacunda, Hernán Arriola.

Coordinador del CoFRU y secretario AFoA: Sebastián Alberti.

Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial: Mario Flores Palenzona.

EVALUADORES DE RESÚMENES EXTENDIDOS

Dr. Lic. Econ. Demián Olemberg. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Centro de Investigación en Economía y Prospectiva, Buenos Aires.

Dr. Ing. Ftal. Enrique Roger. Jardín Botánico “Lucas D. Roic” - Facultad de Ciencias Forestales - Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Dr. Ing. Ftal. Juan Manuel Cellini. Laboratorio de Investigaciones en Maderas (LIMAD) - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - Universidad Nacional de La Plata.

Dr. Ing. Ftal. D. Martín Sandoval. Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA) - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - Universidad Nacional de La Plata.

Dr. Ing. Ftal. Flavio Speranza. INTA, Estación Experimental de Cultivos Tropicales Yuto. Yuto, Jujuy.

Ing. Agr. (Esp.) Matías Gaute. Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial (SAGyP-MEC)

Dr. Ing. Agr. Diego de Abelleyra. INTA, Instituto de Clima y Agua, Castelar, Buenos Aires.

Dra. Ing. Agr. Natalia Tesón. INTA, EEA Concordia, Entre Ríos.

Ing. Ftal. Ciro A. Mastrandrea. INTA, EEA Concordia, Entre Ríos.

Ing. Ftal. (MSc.) Matías S. Martínez. INTA, EEA Concordia, Entre Ríos.

Ing. Ftal. (MSc.) María de los Ángeles García. INTA, EEA Concordia, Entre Ríos.

Ing. Ftal. (MSc.) Carlos de la Peña. INTA, EEA Concordia, Entre Ríos.

Ing. Agr. (MSc.) Sergio Ramos. INTA, EEA Concordia, Entre Ríos.

Ing. Ftal. (MSc.) Leonel Harrand. INTA, EEA Concordia, Entre Ríos.

Ing. Ftal. (MSc.) Carla S. Salto. INTA, EEA Concordia, Entre Ríos.

Ing. Ftal. Mario Flores Palenzona. Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial (SAGyP-MEC).

Diseño de tapa y contratapa: Lic. María Noël Comparetto

Diseño interior y diagramación: Carla S. Salto

Fotos de tapa: Comunicación INTA Concordia



ÍNDICE

PRÓLOGO	4
RECONOCIMIENTO ANUAL	5
DISERTACIONES.....	6
DETERMINACIONES DEL DAÑO Y NIVEL DE DAÑO ECONÓMICO DE HORMIGAS CORTADORAS DE HOJAS EN <i>Eucalyptus grandis</i> EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA: SÍNTESIS DE DOS ENSAYOS EN ENTRE RÍOS Y CORRIENTES.....	7
DE ASIA AL MUNDO: <i>Euwallacea fornicatus</i> UN ESCARABAJO DE AMBROSIA QUE AMENAZA NUESTROS BOSQUES	12
DEL PROBLEMA AL RESULTADO: CASOS REALES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA CADENA FORESTAL	17
LA ENERGÍA POTENCIANDO LA ACTIVIDAD FORESTAL	21
OPTIMIZACIÓN LOGÍSTICA EN EL TRANSPORTE FORESTO INDUSTRIAL: CASOS APLICADOS	28
HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DE LA COSECHA FORESTAL. SOLUCIONES PARA EL GAP TECNOLÓGICO Y LA COMPETITIVIDAD	36
¿POR QUÉ CORRIENTES ESTÁ RECIBIENDO INVERSIONES INDUSTRIALES LIGADAS A LA FORESTACIÓN?	47
RESÚMENES EXTENDIDOS	50
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PRODUCTIVA COMO INSUMO PARA LA SELECCIÓN EN PROGRAMAS DE MEJORAMIENTO GENÉTICO FORESTAL	51
DESARROLLO DEL PRIMER HUERTO SEMILLERO DE <i>Corymbia torelliana</i> PARA CORTINAS ROMPEVIENTOS EN ARGENTINA	56
NUEVOS SAUCES MEJORADOS: UNA OFERTA TECNOLÓGICA INNOVATIVA PARA LA FORESTO- INDUSTRIA Y OTRAS APLICACIONES.....	61
FERTILIZACIÓN INICIAL DE CLONES DE <i>Eucalyptus grandis</i> CON CENIZAS DE CALDERA DE BIOMASA FORESTAL	66
APLICACIÓN DE MODELOS NO LINEALES MIXTOS PARA EL AJUSTE DE UN MODELO HIPSOMÉTRICO PARA <i>Eucalyptus grandis</i> EN ENTRE RÍOS.....	71
MODELO PARA ESTIMACIÓN DE VOLUMEN INDIVIDUAL DEL CLON GC-INTA-27 EN ENTRE RÍOS	76
MODELOS COMPATIBLES DE PERFIL DE FUSTE – VOLUMEN TOTAL PARA CLONES DE <i>Populus</i> EN RODALES DE ALTA DENSIDAD	81
CARACTERIZACIÓN DE ROLLOS Y TABLAS DE TRES CLONES HÍBRIDOS PRECOMERCIALES DE EUCALIPTOS.....	86
VARIACIÓN AXIAL DEL ÍNDICE DE RAJADO EN CLONES DE <i>Eucalyptus grandis</i>	91
EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ MECÁNICA EN VIGAS Y EN PROBETAS ESTANDARIZADAS DE MADERA DE PINO HÍBRIDO	96
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA DE <i>Corymbia citriodora</i> subsp. <i>variegata</i> Y <i>Corymbia torelliana</i>	101
CURVAS DE SECADO AL AIRE LIBRE DE ROLLIZOS DE TRES CLONES DE EUCALIPTOS	106



PRIMERA APROXIMACIÓN DE RENDIMIENTO DE CINCO INDIVIDUOS DE <i>Eucalyptus sideroxylon</i>	111
CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE BIOMASA GENERADA POR PODA INICIAL Y RALEO EN UNA PARCELA EXPERIMENTAL DE PINO OREGON EN CHUBUT	116
SUBPRODUCTOS Y RESIDUOS DE ASERRADEROS CON POTENCIAL USO ENERGÉTICO EN EL DEPARTAMENTO CONCORDIA, ENTRE RÍOS, ARGENTINA	119
LA PARADOJA DEL CARBÓN VEGETAL: CÓMO LAS POLÍTICAS FORESTALES NACIONALES Y LA INTEGRACIÓN VERTICAL MOLDEAN EL MERCADO GLOBAL DEL ACERO VERDE	124
DESAFÍOS DE LA LOGÍSTICA FORESTAL DE LA REGIÓN DE SALTO GRANDE Y OPORTUNIDADES DE LA INDUSTRIA 4.0: UNA EXPLORACIÓN BASADA EN ENTREVISTAS	128
OPTIMIZACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE BIOMASA FORESTAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA	133
COMPARACIÓN DE CRITERIOS DE RENDIMIENTO PARA EL CORTE ÓPTIMO DE MADERA EN ASERRADEROS	138
DESARROLLO DE UN MONITOR WEB DE PRECIOS FORESTALES DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS	143
CAPITAL FORESTAL Y CONTINUIDAD DE DOSEL COMO CRITERIOS PARA EL DISEÑO SILVOPASTORIL: ESTUDIO DE CASO EN UN BOSQUE NATIVO DE SANTIAGO DEL ESTERO, ARGENTINA	147
CLASIFICACIÓN PRODUCTIVA DE SISTEMAS SILVOPASTORILES SEGÚN EL ÁREA BASAL (AB) PARA GÉNERO <i>Eucalyptus</i> Y PINO HÍBRIDO (PEExpCH) PARA MISIONES Y NORTE DE CORRIENTES, ARGENTINA	152
HETEROGENEIDAD FLORÍSTICA Y ESTRUCTURAL DE LA VEGETACIÓN EN TRES SITIOS ECOLÓGICOS DEL ESTABLECIMIENTO EL CARAYÁ, ENTRE RÍOS	157
DESARROLLO DE INFORMACIÓN GENÓMICA DE NOVO Y CARACTERIZACIÓN DE DIVERSIDAD GENÉTICA EN PALO AMARILLO (<i>Phyllostylon rhamnoides</i>) EN LAS YUNGAS ARGENTINAS.....	162
SUSCEPTIBILIDAD A ROYA (<i>Melampsora</i> SPP.) EN CLONES DE ÁLAMO Y SAUCE EN VIVERO	167
ESTUDIO DASOMÉTRICO Y ANÁLISIS PRELIMINAR DE MULTIPLICACIÓN DE <i>Schinus longifolius</i> EN LA REGIÓN PAMPEANA.....	172
GERMINACIÓN, VIABILIDAD Y CONSERVACIÓN DE SEMILLAS DE <i>Solanum granulosum-leprosum</i> COMO APORTES PARA SU REPRODUCCIÓN	177
DINÁMICA DEL ENOS Y LA RESPUESTA HÍDRICA EN CONCORDIA, ARGENTINA (1967–2025)	182
INTA ForestMap: UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE RELEVAMIENTOS FOTOGRAMÉTRICOS Y LIDAR. APLICACIÓN A UN SISTEMA SILVOPASTORIL	186
DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE MATERIA PRIMA: HERRAMIENTA GEOESPACIAL PARA LA CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL RECURSO FORESTAL EN LA ARGENTINA	191
ANÁLISIS Y DELIMITACIÓN ESPACIAL DE HUMEDALES PRIORITARIOS EN UNIDADES DE GESTIÓN FORESTAL: FUNCIÓN HIDROLÓGICA, BIODIVERSIDAD Y CONECTIVIDAD DE PAISAJE	195
ACUMULACIÓN DE ACÍCULAS Y PRECIPITACIÓN COMO DETERMINANTES DE LA FRUCTIFICACIÓN DE <i>Lactarius deliciosus</i> EN PLANTACIONES DE <i>Pinus</i> EN MISIONES, ARGENTINA	200



PRÓLOGO

Cumplir cuatro décadas no es solo alcanzar una cifra simbólica; es celebrar la memoria viva de un sector que ha recorrido mucho camino y que sigue apostando al desarrollo regional. A lo largo de este tiempo, estas jornadas se han consolidado como el punto de encuentro indiscutido para la foresto-industria nacional, contando además con una destacada participación de profesionales e instituciones de Uruguay, Paraguay, Chile y Brasil. Se trata de un espacio clave donde la tradición técnica encuentra la innovación para proyectar el futuro.

Esta edición especial nos trae a la memoria a quienes comenzaron este camino y nos motiva a seguir brindando respuestas a las exigencias del sector. Fieles a esta visión estratégica, el programa de esta edición aniversario refleja los grandes ejes que atraviesan la agenda forestal actual a través de una propuesta integral.

Las disertaciones comenzarán abordando los desafíos de la sanidad y protección forestal, abarcando desde problemáticas tradicionales como la evaluación del impacto y control de hormigas cortadoras de hojas, hasta la alerta global ante amenazas biológicas emergentes como el escarabajo de ambrosía.

Dando paso a la innovación tecnológica y la eficiencia operacional, se presentarán soluciones de vanguardia enfocadas en la aplicación de Inteligencia Artificial, herramientas clave para cerrar la brecha tecnológica en la cosecha, y estrategias dirigidas a optimizar la logística en el transporte foresto-industrial.

Finalmente, el eje de sostenibilidad y futuro reunirá a empresas líderes en producción sostenible para compartir casos exitosos de vinculación entre energía y producción, así como el desarrollo basado en la naturaleza a través del *Mass Timber*, posicionado como una respuesta estratégica para el bienestar social y la descarbonización del planeta.

Llegar a 40 ediciones de estas jornadas no hubiera sido posible sin la confianza y el compromiso constante de todo el sector. Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a quienes nos acompañan año tras año, a quienes se suman por primera vez a este espacio y a cada una de las instituciones, empresas y colaboradores que apoyan de diversas maneras la realización de este encuentro, permitiendo que cuatro décadas después sigamos construyendo juntos el futuro de la actividad foresto-industrial.

Comisión organizadora



RECONOCIMIENTO ANUAL

Como es tradición en estas Jornadas, cada año la Comisión Organizadora distingue a personas, empresas e instituciones que con su trabajo y compromiso han contribuido al desarrollo del sector foresto-industrial de nuestra provincia.



En esta oportunidad, el reconocimiento es otorgado a la **familia Fracalossi**, cuya trayectoria constituye un ejemplo de visión emprendedora, innovación y apuesta permanente al crecimiento de la actividad foresto-industrial entrerriana.

La historia de la familia está ligada al desarrollo de **Fracalossi Maderas**, empresa fundada en Concordia en 1992. Lo que comenzó como un pequeño taller dedicado a la producción de madera para embalajes fue creciendo de manera sostenida hasta convertirse en una de las industrias más importantes y modernas de la Argentina en la transformación de madera de *Eucalyptus grandis*.

A lo largo de más de tres décadas, la empresa se destacó por incorporar tecnología y agregar valor a la producción forestal. Fue pionera en la

utilización de secaderos para mejorar la calidad de la madera, desarrolló la fabricación de pisos terminados con estándares internacionales y recientemente incorporó equipamiento automatizado de última generación para optimizar sus procesos productivos.

Su fuerte especialización en *Eucalyptus grandis*, su visión integral de la cadena productiva y su compromiso con la mejora continua la han convertido en una empresa referente de la foresto-industria regional y en un modelo para el desarrollo del sector en Entre Ríos.

Por su destacada trayectoria, por su aporte a la generación de empleo, la innovación y el desarrollo regional, las Jornadas Forestales de Entre Ríos tienen el honor de otorgar el **Reconocimiento Anual** a la **familia Fracalossi**.



DISERTACIONES



DETERMINACIONES DEL DAÑO Y NIVEL DE DAÑO ECONÓMICO DE HORMIGAS CORTADORAS DE HOJAS EN *Eucalyptus grandis* EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA: SÍNTESIS DE DOS ENSAYOS EN ENTRE RÍOS Y CORRIENTES

Abel SCHERF¹, Edgar ESKIVISKI¹, Andrea ANDORNO², Sergio RAMOS³, Eduardo HILDT¹,
Beatriz REITANO⁴, Cecilia PIZZINI⁴

RESUMEN

Las hormigas cortadoras de hojas (HCH) constituyen la principal plaga de las plantaciones forestales del Neotrópico, y en la Mesopotamia argentina su control puede insumir hasta el 20 % del costo de una plantación lograda. La estimación de niveles de daño económico (NDE) resulta necesaria para racionalizar el control y cumplir con los requisitos de los esquemas de certificación forestal, pero la información regional disponible es escasa. Este trabajo consolida los resultados de dos ensayos de nivel de daño realizados en la Mesopotamia argentina, uno en El Potrero de San Lorenzo, Gualeguaychú (Entre Ríos), y otro en un rodal de Forestal Argentina SA en Paso de los Libres (Corrientes), ambos con parcelas de densidad creciente de nidos de *Acromyrmex* spp. (0, 2, 4, 6 y 8 nidos/ha). En Gualeguaychú, a los 72 días posplantación, no se detectaron diferencias significativas en el crecimiento en altura entre tratamientos, pero las pérdidas de plantas atribuibles a HCH aumentaron de forma sostenida con la densidad de nidos (12 a 53 %). En Paso de los Libres, con un seguimiento de 3,5 años, el diámetro a la altura del cuello, la altura total y el volumen individual con corteza fueron afectados significativamente por la densidad de hormigueros, y la pérdida económica estimada alcanzó 296,92 USD/ha en el tratamiento de 8 nidos/ha; el NDE se ubicó entre 2 y 4 nidos/ha. Los resultados de ambos sitios refuerzan la necesidad de diferenciar las estrategias de manejo integrado según la especie y la etapa fenológica de la plantación.

Palabras clave: *Acromyrmex*, manejo integrado de plagas, forestales

1. INTRODUCCIÓN

La forestación con especies de rápido crecimiento, principalmente *Eucalyptus* spp. y *Pinus* spp., constituye una de las actividades productivas de mayor relevancia económica en la Mesopotamia argentina, región que incluye las provincias de Entre Ríos, Corrientes y Misiones. Sobre esta base productiva inciden numerosos factores bióticos que condicionan el establecimiento y la productividad de los rodales, entre los cuales las hormigas cortadoras de hojas (HCH) —insectos de la tribu Attini, géneros *Atta*, *Acromyrmex* y *Amoimyrmex*— ocupan un lugar central por ser consideradas la plaga forestal de mayor importancia económica en el Neotrópico.

Las HCH cortan y transportan material vegetal fresco hacia sus nidos, donde lo emplean como sustrato para el cultivo de un hongo simbionte del cual se alimentan. Este comportamiento forrajero determina defoliaciones totales o parciales que se traducen en mortalidad de plantas, reducción del crecimiento y pérdida de calidad del fuste por bifurcación y tortuosidad. El impacto es particularmente severo durante los primeros meses posteriores a la plantación, cuando las plántulas presentan escasa capacidad de rebrote frente al ataque. En Argentina predominan especies del género *Acromyrmex*, que construyen nidos superficiales de morfología diversa —cubiertos por hojas secas, montículo de tierra suelta o solo bocas de ingreso— y cuya densidad se incrementa progresivamente en plantaciones jóvenes hasta

¹ INTA EEA Montecarlo. scherf.abel@inta.gob.ar

² INTA EEA Castelar

³ INTA EEA Concordia

⁴ Forestal Argentina S.A.



que el cierre del dosel reduce la disponibilidad de luz y, con ella, la abundancia de nidos activos (Reis Filho et al., 2021).

El manejo integrado de plagas (MIP) aplicado a las HCH se sustenta en dos conceptos complementarios: el umbral de daño, que señala el nivel de infestación a partir del cual se recomienda intervenir, y el nivel de daño económico (NDE), definido como la densidad de plaga a partir de la cual el costo del daño supera al costo del control. La determinación empírica del NDE es un requisito técnico para que las empresas forestales puedan certificar programas de manejo integrado ante organismos de certificación de sustentabilidad, en un contexto en el que las políticas de plaguicidas de esquemas como el Forest Stewardship Council (FSC) han impulsado una reducción progresiva del uso de ingredientes activos químicos y un mayor desarrollo de alternativas de control menos agresivas para el ambiente. Sin embargo, la información disponible para estimar NDE en plantaciones forestales argentinas continúa siendo limitada, lo que dificulta la toma de decisiones de control basada en evidencia local.

El control de HCH se realiza mayoritariamente mediante el uso de cebo granulado, formulación que consiste en una matriz atrayente, para que las HCH lo identifiquen como un buen sustrato para el cultivo de su hongo simbionte, y un insecticida enmascarado (usualmente fipronil, sulfluramida o isocycloseram) que produce la intoxicación y colapso generalizado de las colonias tratadas adecuadamente. El cebo granulado puede ser aplicado de forma sistemática, cubriendo la totalidad del área a tratar con una dosis fija por hectárea —recomendado en áreas con presencia de nidos difíciles de encontrar como los de *Acromyrmex* o juveniles de *Atta*— o de forma dirigida, localizando y dosificando cada hormiguero según su tamaño —recomendado en áreas con presencia de *Atta*—.

La frecuencia del control de HCH en plantaciones forestales debe adecuarse al género de hormiga presente, en áreas con presencia de *Atta* se recomienda un control más intensivo, incluyendo —además de los controles pre y post plantación— un control precosecha y, de ser posible, controles de mantenimiento anual sostenido en el tiempo, mientras que en áreas donde ocurren exclusivamente *Acromyrmex* el esfuerzo de control puede concentrarse en la etapa pre y postplantación y discontinuarse una vez superados los primeros meses del cultivo (alrededor de 18 meses en *Eucalyptus* y hasta 36 meses en *Pinus*), dado que estas especies afectan principalmente a las plantas recién establecidas.

En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo consolidar y analizar comparativamente los resultados de dos ensayos de campo de umbral de daño por HCH conducidos de manera independiente en la Mesopotamia argentina —Gualeguaychú (Entre Ríos) y Paso de los Libres (Corrientes)—, ambos basados en gradientes controlados de densidad de nidos de *Acromyrmex* spp. sobre plantaciones de *E. grandis*, con el fin de aportar evidencia empírica regional para la estimación de niveles de daño económico y para orientar recomendaciones de manejo integrado ajustadas a las condiciones locales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio Gualeguaychú, Entre Ríos. El ensayo se estableció en El Potrero de San Lorenzo, sobre una plantación de *E. grandis* implantada en octubre de 2023. Se dispusieron cinco tratamientos de densidad creciente de nidos de *Acromyrmex* spp.: A (0 nidos/ha, control), B (2 nidos/ha), C (4 nidos/ha), D (8 nidos/ha) y E (6 nidos/ha). Se realizaron evaluaciones periódicas de las plantas, registrándose el crecimiento en altura y el estado sanitario individual mediante una escala de niveles de daño por defoliación (0 = sin daño; 1 = 50 % de copa defoliada; 2 = 75 % de copa defoliada; 3 = 100 % de copa defoliada; 4 = 100 % de copa defoliada más pérdida del ápice), además de categorías de estado de planta: faltante, seca, rebrotada y quebrada. La evaluación de estado de planta se realizó a los 72 días posplantación sobre el total de individuos de cada parcela de tratamiento.

Sitio Paso de los Libres, Corrientes. El ensayo fue conducido en un rodal forestal de 11,2 ha propiedad de Forestal Argentina SA. Previo a la implantación se realizó un censo de hormigueros en toda la superficie del rodal, lo que permitió delimitar las cinco parcelas de 0,5 ha, de la misma manera que se realizó en Gualeguaychú. La composición de la comunidad de hormigas correspondió a *Acromyrmex lundii* (30 %) y *Acromyrmex heyeri* (70 %).



La plantación de *E. grandis* se realizó en octubre de 2020. A partir de ese momento se efectuaron mediciones periódicas hasta los dos años, registrándose mortalidad, diámetro a la altura del cuello (DAC), altura total y nivel de daño por parcela. Se realizó, además, una evaluación adicional en junio de 2024, a los 3 años y 8 meses (~3,5 años) de la plantación, momento en el cual ya se habían efectuado el primer raleo (sistemático más selectivo) y la primera poda. En esta instancia se incorporó el diámetro a la altura del pecho (DAP) y se estimó el volumen individual con corteza mediante el modelo de volumen con corteza ajustado para esa región $\ln(vcc) = (-10,1718 + 1,76615 \ln(DAP) + 1,18741 \cdot \ln(h)) \cdot 1,0040878$ (Fassola et al., 2007). El impacto económico de cada nivel de infestación se calculó como la diferencia de volumen de madera con corteza acumulado respecto de la parcela control, extrapolada a la hectárea y valorizada con un precio de referencia de madera en pie de 22,8 USD/m³.

3. RESULTADOS

Sitio Gualaguaychú, Entre Ríos. El análisis del crecimiento en altura a la fecha de evaluación no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de densidad de nidos (Tabla 1). Los valores de crecimiento no siguieron un patrón monótono respecto de la densidad de nidos, lo que resulta esperable dado el corto plazo de evaluación (72 días) y la elevada variabilidad propia de plantines recién establecidos.

Tabla 1. Crecimiento en altura y porcentaje de pérdida de plantas atribuible a HCH, descontada la pérdida basal del tratamiento control según densidad de nidos de *Acromyrmex* spp.

Tratamiento (nidos/ha)	Crecimiento en altura (cm)	Pérdida de plantas por HCH (%)
0	26,40	-
2	27,50	12
4	35,20	18
6	29,92	21
8	23,62	53

En cuanto al estado sanitario de las plantas, a los 72 días posplantación se observaron individuos con niveles de daño 2, 3 y 4, aunque la categoría predominante fue la de plantas faltantes, acompañada en menor proporción por plantas secas, quebradas o rebrotadas. En la parcela control (0 nidos/ha) se registró un 20 % de pérdida de plantas, valor que se interpretó como pérdida basal no atribuible a HCH (mortalidad de implantación, factores climáticos o de manejo) y que fue descontado del resto de los tratamientos para aislar el efecto específico de las hormigas cortadoras. Las pérdidas de plantas netamente atribuibles a HCH mostraron un incremento sostenido con la densidad de nidos (Tabla 1), alcanzando su valor máximo en el tratamiento de mayor densidad (8 nidos/ha).

La asimetría entre el patrón de pérdida de plantas —claramente creciente con la densidad de nidos— y la ausencia de diferencias significativas en altura sugiere que, en esta etapa temprana, la variable de crecimiento de las plantas sobrevivientes es un indicador menos sensible del impacto de las HCH que la proporción de individuos perdidos.

Sitio Paso de los Libres, Corrientes. Los resultados del seguimiento bianual mostraron que la mortalidad provocada por HCH alcanzó valores considerables, concentrándose principalmente en la parcela de mayor abundancia de hormigueros. Sobre las variables de crecimiento evaluadas hasta el segundo año, tanto el DAC como la altura total resultaron afectados de manera estadísticamente significativa en las parcelas con presencia de HCH, con la mayor afectación registrada en la parcela de 8 nidos/ha. De manera notable, el DAC de la parcela de 6 nidos/ha no se diferenció significativamente del tratamiento sin hormigueros (Gráfico 1).

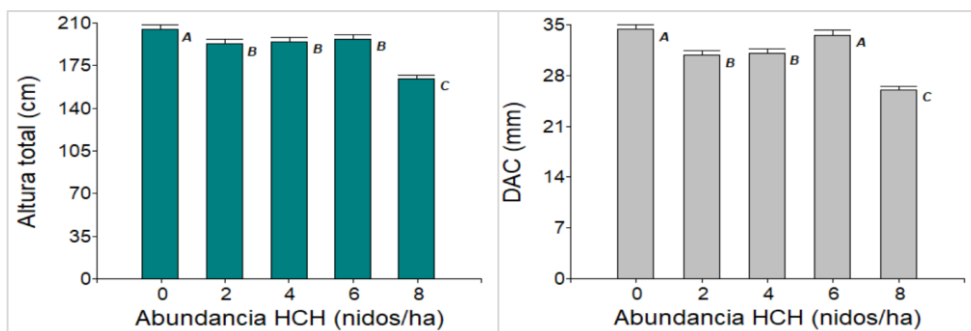


Gráfico 1. Efecto al 2º año de distintas abundancias de hormigueros sobre la altura total y el diámetro a la altura del cuello (DAC) de *E. grandis*. LSD Fisher, α : 0.05. Medias con letra común no son significativamente diferentes.

En la evaluación adicional realizada a los 3,5 años, posterior al primer raleo y a la primera poda, el efecto de los tratamientos se mantuvo significativo para las tres variables analizadas (DAP, altura total y volumen individual), aunque en esta instancia solo los dos tratamientos de mayor densidad de nidos (6 y 8 nidos/ha) se diferenciaron estadísticamente del control (Gráfico 2). Este cambio respecto de la evaluación a los dos años podría explicarse por la atenuación del efecto del daño con el paso del tiempo —dado que el ataque de HCH se concentró durante el primer año de la plantación— o bien por una reducción de las diferencias entre tratamientos como consecuencia del propio raleo aplicado.

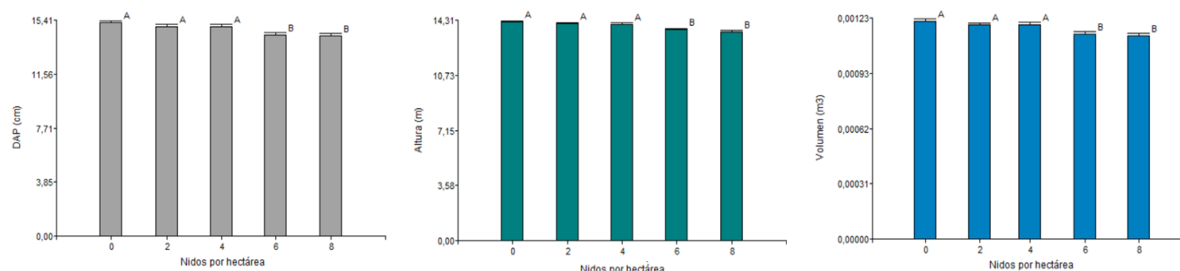


Gráfico 2. Efecto a 3,5 años de distintas abundancias de hormigueros sobre DAP, altura y volumen individual.

El número total de plantas por parcela a los 3,5 años, posterior al raleo, se mantuvo relativamente semejante entre tratamientos respecto de la parcela control. Sin embargo, al excluir del análisis el 25 % de las plantas de menor DAP (cuartil 1, $DAP \leq 13,6$ cm), se observó que las plantas de mayor porte se concentraron en los tratamientos de menor presencia de hormigas, con una diferencia de 28 % menos plantas grandes en la parcela de 8 nidos/ha respecto del control. Un patrón más contundente se registró sobre el volumen total de madera con corteza acumulado por parcela: en el tratamiento de 8 nidos/ha el volumen total fue 28 % menor que en el control, diferencia que se amplió a 35 % al excluir el cuartil 1 de DAP (Gráfico 3), lo que evidencia el efecto negativo del ataque de HCH sobre la calidad y homogeneidad del rodal, más allá de su efecto sobre la supervivencia bruta de plantas.

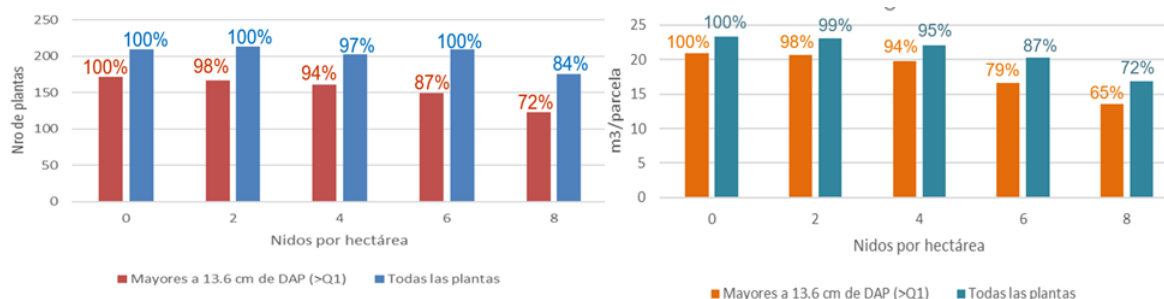


Gráfico 3. Número de plantas y volumen de madera con corteza por parcela a los 3,5 años, posterior al primer raleo. Los porcentajes sobre las columnas de cada tratamiento fueron calculados respecto a la parcela sin hormigueros.



La valorización económica de estas diferencias de volumen, extrapoladas a la hectárea y calculadas con un precio de referencia de 22,8 USD/m³ de madera en pie, se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Estimación de la pérdida económica por nivel de infestación con HCH sobre *E. grandis* a los 3,5 años, ensayo Paso de los Libres (precio de madera en pie: 22,8 USD/m³).

Nidos/ha	Dif. volumen vs. control (m ³ /parcela)	Dif. volumen vs. control (m ³ /ha)	Pérdida económica (USD/ha)
0	0	0	0,00
2	0,303	0,606	13,83
4	1,243	2,487	56,70
6	3,079	6,158	140,39
8	6,511	13,023	296,92

Considerando un costo de referencia de control de 25 USD/ha, el nivel de daño económico (NDE) para *Acromyrmex* spp. se ubicó entre 2 y 4 nidos/ha, valor superior al reportado en la misma región para el género *Acromyrmex* sobre *Pinus* sp. (< 1 nido/ha) (Nuñez-Cresto et al., 2020). No obstante, la claridad de la tendencia observada, la falta de repeticiones del ensayo en otros sitios impide considerar estos hallazgos como concluyentes, recomendándose su validación en nuevos sitios y momentos.

4. CONCLUSIONES

Los dos ensayos muestran de forma consistente una relación creciente entre la densidad de nidos de *Acromyrmex* spp. y el impacto negativo sobre plantaciones jóvenes de *E. grandis*, expresado como pérdida de plantas en la etapa temprana de establecimiento (Guaqueguaychú) y como reducción del crecimiento, el volumen y el valor económico del rodal en el mediano plazo (Paso de los Libres).

En Paso de los Libres, el nivel de daño económico estimado para *Acromyrmex* spp. se ubicó entre 2 y 4 nidos/ha, superior al descrito por NUÑEZ-CRESTO et al. (2020) para este género y sobre *Pinus* en la misma región, lo que confirma la necesidad de establecer umbrales diferenciados por especie forestal al momento de definir estrategias de manejo integrado.

El seguimiento volumétrico de mediano plazo resultó más informativo que los indicadores de crecimiento en altura de corto plazo para cuantificar el impacto económico real de las HCH, por lo que se recomienda que futuros ensayos de umbral de daño en la región incorporen mediciones dasométricas y modelos de volumen ajustados localmente desde etapas tempranas del ensayo.

Dada la limitación de repeticiones espaciales y temporales de los ensayos, se recomienda continuar y ampliar esta línea de investigación mediante incorporación de nuevos sitios en la Mesopotamia argentina, de manera de consolidar estimaciones de NDE robustas que sirvan de base para la toma de decisiones operativas de las empresas forestales.

5. LITERATURA CITADA

- FASSOLA, H., CRECHI, E., KELLER, A., Y BARTH, S., FERNÁNDEZ, E. 2007. Funciones y algoritmos dasométricos para manejo silvícola intensivo, de aplicación en plantaciones forestales orientadas a la producción de madera de alto valor agregado. PAN 571. INTA EEA Montecarlo, Misiones. Argentina.
- NUÑEZ-CRESTO M., PEZZUTTI, R., CANTARELLI, E. 2020. Determinación del daño causado por hormigas cortadoras en la implantación de *Pinus taeda*. Actas de las XXXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Octubre de 2020.
- REIS FILHO, W., NICKELE, M. A., PENTEADO, S. R. C., QUEIROZ, E. C. 2021. *Manejo de formigas cortadeiras em plantios de Pinus e Eucalyptus* (Comunicado Técnico No. 471). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).



DE ASIA AL MUNDO: *Euwallacea fornicatus* UN ESCARABAJO DE AMBROSIA QUE AMENAZA NUESTROS BOSQUES

Esteban CERIANI-NAKAMURAKARE^{1,2}, Ana TREBINO³, Patricia MC CARGO^{1,4}

RESUMEN

Euwallacea fornicatus (Col.: Scolytinae), conocido como barrenador polífago de ambrosía o PSHB (*polyphagous shot hole borer*), es nativo del sudeste asiático y posee como simbionte a *Neocosmospora euwallaceae*. En conjunto causan mortalidad de árboles hospedantes, como se ha registrado en invasiones ocurridas en múltiples países distantes geográficamente. En 2023 se confirmó y publicó por primera vez la presencia de *E. fornicatus* en Sudamérica, con registros provenientes del arbolado urbano de la Ciudad de Buenos Aires, Argentina. El establecimiento de PSHB planteó interrogantes sobre el origen de la introducción, el rango de hospedantes nativos potencialmente afectados y el riesgo de expansión hacia ecosistemas del continente. El objetivo de este trabajo es difundir los síntomas asociados al ataque de PSHB, describir el espectro de hospedantes registrados en la región y discutir la dinámica de avance territorial de la plaga en Sudamérica. Para ello, se integró información morfológica y molecular (COI) obtenida de especímenes colectados en sitios de muestreo urbanos, junto con el seguimiento de nuevos registros geográficos detectados en países limítrofes desde el hallazgo inicial. Los análisis moleculares indicaron que la población detectada en Argentina, Uruguay y Brasil correspondería a un haplotipo filogenéticamente relacionado con poblaciones de China y Taiwán. El listado de hospedantes reproductivos relevado en la región amplía significativamente el rango conocido para la especie, e incluye especies forestales, ornamentales y frutales de relevancia económica. La proyección de avance territorial, indica una capacidad de expansión media/rápida asociada a corredores urbanos y portuarios, con riesgo creciente para sistemas forestales productivos y nativos del Cono Sur. Estos resultados remarcan la necesidad de fortalecer los sistemas de vigilancia fitosanitaria y de profundizar el monitoreo de haplotipos en la región para anticipar el comportamiento invasivo de esta plaga establecida.

Palabras clave: *PSHB, especie exótica, plaga, vigilancia fitosanitaria, Neocosmospora, Fusarium*

1. INTRODUCCIÓN

Euwallacea fornicatus (Eichhoff, 1868) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae), conocido internacionalmente como PSHB (*polyphagous shot hole borer*) o barrenador polífago de ambrosía, integra un complejo de especies crípticas nativas del sudeste asiático. Como el resto de los escarabajos de ambrosía, establece una relación simbiótica obligada con organismos fúngicos. En este caso, la asociación involucra al hongo *Neocosmospora euwallaceae* (syn. *Fusarium euwallaceae*), que cultiva dentro de sus galerías y que constituye el alimento de adultos y larvas. La introducción de este complejo fuera de su área de distribución original ha derivado en algunas de las invasiones de insectos forestales más severas de las últimas dos décadas: Estados Unidos (California, 2003; Hawaii, 2006), Israel (2009), Sudáfrica (2016), Brasil (2020), Argentina y Australia (2021), España (2022), Uruguay (2023) y Turquía (2024), además de intercepciones en invernaderos europeos y diversos puertos marítimos alrededor del mundo. En este escenario, el ataque combinado del escarabajo y su simbionte fúngico provoca el bloqueo del flujo de savia, marchitamiento progresivo y muerte de hospedantes leñosos, con fuerte

¹ Instituto de Micología y Botánica (INMIBO), UBA-CONICET. patomccargo@gmail.com; cerianinaka@gmail.com

² Cat. de Física, Facultad de Agronomía. UBA.

³ Universidad de Favaloro. anitrebino@gmail.com

⁴ Departamento de Biodiversidad y Biología Experimental, FCEyN, UBA



impacto en arbolado urbano, sistemas productivos (palta, pecan, citrus, etc.) y, documentado en menor medida, en ecosistemas nativos.

En el año 2023 se publicó el primer artículo científico reportando a *E. fornicatus* en Sudamérica (Ceriani-Nakamurakare et al., 2023). Se identificó la especie a partir de especímenes colectados en arbolado urbano de la Ciudad de Buenos Aires, Argentina, lo que planteó de inmediato interrogantes sobre el origen de la población introducida, el rango de hospedantes reproductivos disponible en la región, la capacidad de dispersión de la plaga y el riesgo que representa para los bosques productivos y nativos de Argentina y países limítrofes.

El objetivo de esta presentación es sintetizar las características biológicas de la especie, los síntomas característicos del ataque, describir el espectro de hospedantes reproductivos relevado en la región desde el registro inicial, y presentar una proyección del avance territorial de la plaga en Sudamérica en función del patrón de dispersión observado y de la identidad haplotípica de las poblaciones invasoras.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La información presentada en este trabajo integra resultados propios obtenidos a partir del primer registro de *E. fornicatus* en Argentina y de su posterior seguimiento en la región, junto con antecedentes bibliográficos sobre la biología e historia de invasión del complejo a nivel mundial. Los especímenes utilizados para la caracterización morfológica y molecular fueron colectados mediante trampas cebadas con atrayentes específicos para escarabajos de ambrosía y/o mediante inspección directa de árboles con síntomas compatibles. Los sitios de estudio fueron bosques urbanos de la Ciudad de Buenos Aires.

La identificación a nivel de especie y haplotipo, se realizó mediante comparación de caracteres morfológicos diagnósticos con bibliografía especializada, complementada con análisis moleculares del gen mitocondrial Citocromo Oxidasa I (COI), cuyas secuencias fueron comparadas contra bases de referencia y registros previos de *E. fornicatus* a nivel mundial (Ceriani-Nakamurakare et al., 2023, 2025; Lantschner et al., 2026). El relevamiento de hospedantes reproductivos se realizó mediante inspección de las especies arbóreas afectadas, confirmando la condición de hospedante reproductivo (y no de ataque ocasional) a través de la observación de galerías con presencia de descendencia (huevos, larvas, pupas y/o adultos) y desarrollo del hongo simbionte.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estudios morfológicos y moleculares realizados sobre los especímenes colectados desde el registro inicial (2020-2024), permitieron establecer un origen geográfico probable asociado a poblaciones nativas de la especie en el sudeste asiático (Hainan, China y/o Taiwán), y confirmaron que el haplotipo establecido en Argentina (Figura 1) es distinto del que ha causado los daños severos descriptos en Sudáfrica, Israel y Estados Unidos (California). La identidad haplotípica de las poblaciones argentinas constituye una herramienta clave para reconstruir el origen de la introducción y diferenciar el comportamiento esperado de esta invasión respecto de otras ya documentadas.



Euwallacea fornicatus

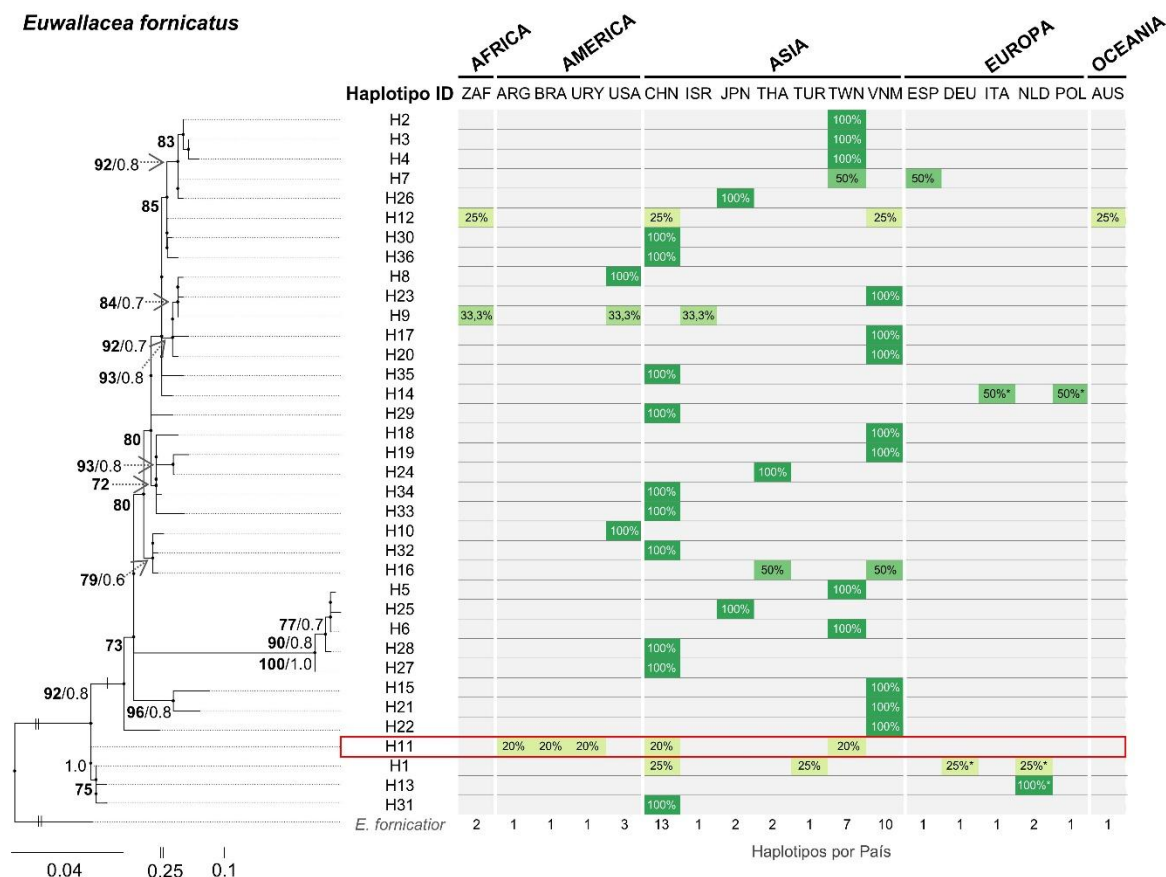


Figura 1. Estructura filogeográfica y distribución de haplotipos de *Euwallacea fornicatus*. Izquierda: Árbol filogenético de máxima verosimilitud de 36 haplotipos (H1–H36), utilizando *E. fornicator* como grupo externo. Los valores de soporte de los nodos corresponden a las probabilidades de Bootstrap y SH-aLRT (>60 % en negrita y >0,5, respectivamente). La longitud de las ramas representa el número de sustituciones nucleotídicas. Derecha: mapa de calor indicando la proporción de ocurrencia (%) de cada haplotipo en los países relevados; las celdas con 100 % indican haplotipos exclusivos de un determinado país. Códigos de los países: ARG: Argentina, AUS: Australia, BRA: Brasil, CHN: China, DEU: Alemania, ESP: España, ISR: Israel, ITA: Italia, JPN: Japón, NLD: Países Bajos, POL: Polonia, THA: Tailandia, TUR: Turquía, TWN: Taiwán, URY: Uruguay, USA: Estados Unidos de América, VNM: Vietnam, ZAF: Sudáfrica.

Los patrones de ataque y los síntomas asociados en el hospedante (marchitamiento, gomosis, manchado del xilema) resultaron relativamente sencillos de identificar pese al ciclo de vida críptico de la especie. Esta combinación de síntomas facilita el reconocimiento preliminar a campo (Figura 2). El relevamiento de hospedantes reproductivos en la región amplió de manera significativa el rango conocido para el haplotipo asiático detectado, e incluyó especies de relevancia forestal, ornamental y frutícola, reconfirmando el carácter polífago de la plaga. No obstante, la severidad del daño generado en nuevos hospedantes continúa siendo objeto de estudio.

El avance territorial de la plaga está fuertemente mediado por factores antropogénicos, señalando a los corredores urbanos y portuarios del Cono Sur como las vías de mayor riesgo de expansión, sugiriendo una potencial afectación de sistemas forestales productivos y nativos aún no relevados.



Figura 2. Características de infestación y morfología de *Euwallacea fornicatus*. (I) Síntomas externos de infestación, ataques (orificios de entrada/salida) y aserrín expulsado. (II) Ataques y halo de decoloración debajo de la corteza. (III) Leña infestada -flecha roja indica ataque activo-. (IV) Hembra en vistas dorsal, lateral y ventral (escala 1 mm). (V) Sistema de galerías asociado con la infestación de *E. fornicatus*.

4. CONCLUSIONES

La información sintetizada en este trabajo permite caracterizar a *E. fornicatus* como una plaga exótica invasora de "reciente" confirmación en Argentina, cuyo impacto potencial sobre los bosques productivos y nativos de la región aún permanece subestimado.

En este contexto, se recomienda fuertemente generar un sistema de vigilancia específico que también contemple otras especies problemáticas de coleópteros de ambrosía, con el fin último de fortalecer los sistemas de vigilancia fitosanitaria en puntos de ingreso y corredores de riesgo identificados, estandarizar protocolos de muestreo y diagnóstico morfológico-molecular que permitan la detección temprana y la identificación haplotípica de nuevas poblaciones. Es imperativo promover la capacitación de técnicos y profesionales forestales, como herramienta de alerta temprana frente a su avance en la región.



5. LITERATURA CITADA

- CERIANI-NAKAMURAKARE, E.; JOHNSON, A.J.; GOMEZ, D.F. 2023. Uncharted territories: first report of *Euwallacea fornicatus* (Eichhoff) in South America with new reproductive hosts records. *Zootaxa*. 5325(2): 289–297.
- CERIANI-NAKAMURAKARE, E.; GOMEZ, D.F.; TREBINO, A.; LISTRE, A.; INGARAMO, L.; ARMAND PILÓN, A.; BOLLAZZI, M. 2025. Increasing breeding host range and fast spread across Uruguay reveals the invasion potential of *Euwallacea fornicatus* (Coleoptera, Scolytinae) in South America. *NeoBiota*. 98: 247–260.
- LANTSCHNER, M.V.*; CERIANI-NAKAMURAKARE, E*; JOHNSON, A.J.; COGNATO, A.I.; SMITH, S.M.; GOMEZ, D.F. 2026. Invasion history reconstruction and potential distribution of the ambrosia beetles *Euwallacea fornicatus* and *E. perbrevis* (Coleoptera: Scolytinae), two global emerging pests. *Journal of Pest Science*. doi: <https://doi.org/10.1007/s10340-026-02070-w> *primer autoría compartida.



DEL PROBLEMA AL RESULTADO: CASOS REALES DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA CADENA FORESTAL

Santiago FERRANDO¹

RESUMEN

El avance de la inteligencia artificial (IA), el machine learning (ML) y el internet de las cosas (IoT) ofrece hoy soluciones concretas y verificables para la cadena de producción forestal, más allá de la expectativa genérica en torno a estas tecnologías. Este trabajo presenta un relato de diez casos reales, desarrollados o en curso, aplicados a seis etapas de la cadena forestal: vivero, silvicultura, cosecha, planeamiento, sanidad forestal y control de procesos. Se describen para cada caso el problema abordado, la tecnología aplicada (visión por computadora, redes neuronales, agentes conversacionales basados en LLM, geoprocésamiento y dispositivos IoT) y los resultados obtenidos, en fases que van desde la prueba de concepto hasta la operación comercial. Los casos incluyen monitoreo sanitario de plantines, planificación y seguimiento de controles de calidad, trazabilidad geoespacial de plantación, analítica de cosecha, optimización de rutas de extracción, delimitación automática de rodales y trampas inteligentes para plagas. La discusión final plantea un criterio práctico para evaluar cuándo la IA aporta valor real: focalizar en problemas concretos, medibles y bien definidos, en lugar de una adopción genérica de la tecnología.

Palabras clave: *machine learning; visión por computadora; agentes conversacionales; automatización de procesos.*

1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de la inteligencia artificial al sector forestal suele discutirse en términos generales, sin diferenciar entre técnicas con propósitos y requisitos muy distintos. Conviene distinguir al menos tres enfoques: el *machine learning* clásico, que aprende patrones a partir de datos históricos propios y produce predicciones o clasificaciones auditables (ej.: modelos de crecimiento, riesgo de incendio); la IA generativa, entrenada con grandes volúmenes de texto e imágenes, útil para sintetizar información, redactar y generar código sin necesidad de datos propios; y el *deep learning*, la base técnica común a ambas, especialmente relevante en visión por computadora y procesamiento de lenguaje natural. Sobre esta base también resulta útil distinguir un asistente de IA, que responde cuando se le consulta, de un agente de IA, capaz de ejecutar tareas de forma autónoma y encadenar decisiones sin supervisión en cada paso.

Un antecedente relevante para encuadrar la discusión es el reporte del MIT Sloan Management Review, que documentó que el 95 % de las empresas que invirtieron en IA interna no obtuvieron un retorno medible, mientras que el 5 % que sí tuvo éxito se concentró en un único problema concreto, bien definido y medible. Este trabajo adopta ese criterio como principio metodológico: no toda la cadena forestal se beneficia por igual de estas herramientas, y el valor aparece cuando se identifican con precisión los puntos donde la tecnología libera tiempo real o reduce un riesgo concreto.

El objetivo de esta presentación es recorrer diez líneas de trabajo con IA, ML e IoT, desarrolladas por Ferrando & Asociados en articulación con instituciones de investigación (ANII, INIA) y empresas del sector, mostrando en cada caso el problema de origen, la solución aplicada y el resultado obtenido.

¹ Ferrando & Asociados. Tacuarembó, Uruguay. santiago.ferrando@ferrandoyasociados.com; +59891863888
ferrandoyasociados.com



2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se sistematizaron diez proyectos de aplicación de IA, ML e IoT desarrollados por Ferrando & Asociados entre 2024 y 2026, agrupados según la etapa de la cadena forestal a la que corresponden: vivero, silvicultura, cosecha, planeamiento, sanidad forestal y control de procesos. Para cada caso se documentó: (i) el problema operativo que motivó el desarrollo, (ii) la fase de madurez alcanzada (prueba de concepto, MVP, producto comercial u operación en producción), (iii) la tecnología aplicada (visión por computadora, redes neuronales, modelos de lenguaje, geoprocetamiento, dispositivos IoT) y (iv) los resultados cuantitativos u operativos disponibles a la fecha. La información proviene de proyectos propios y de colaboraciones con instituciones de investigación y empresas del sector forestal uruguayo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Vivero — Monitoreo Inteligente de Plantines

El monitoreo visual manual del estado sanitario de los plantines en vivero es subjetivo, de baja frecuencia y no escala a la superficie real del vivero; además, evaluar el enraizamiento hoy requiere arrancar y destruir la planta. Se desarrolló un sistema de monitoreo automatizado mediante visión por computadora utilizando redes neuronales para detección multiclase de enfermedades y plagas, y para estrés hídrico y enraizamiento combinando cámaras térmicas y RGB, integrado en una app móvil de campo que corre incluso sin conexión a internet. El sistema, que avanzó de prueba de concepto a MVP, alcanzó más de 75 % de precisión en detección multiclase de enfermedades, más de 90 % de concordancia con expertos en severidad de enfermedades y F1-scores de más de 85 % tanto en estrés hídrico como en detección de enraizamiento.

3.2 Silvicultura. PlanifiKER.IA

La planificación manual mensual y semanal de los controles de calidad forestal es lenta y propensa a errores, y no existe un cruce sistemático entre lo planificado y lo efectivamente ejecutado en el terreno. PlanifiKER.IA es un sistema de inteligencia operativa que planifica, hace seguimiento y proyecta el cumplimiento de los controles, con un modelo de lenguaje (GPT-4o) para planificación automática y chat conversacional, sobre una arquitectura web multiusuario con mapa interactivo por núcleos y predios. En fase de MVP funcional, en validación con usuarios, reduce la planificación semanal de horas a minutos.

3.3 Silvicultura. SilviOK

Los plazos de control forestal por rodal suelen manejarse en planillas sin alerta automática, por lo que cuando un plazo vence el daño agronómico ya ocurrió. SilviOK es un agente de software que interpreta en lenguaje natural el registro del encargado de campo, lo convierte en fecha validada mediante un motor de reglas configurable, y envía alertas por Telegram con confirmación de un toque, más un resumen semanal por email. Probado con datos reales de campo camino a un MVP dual, el 94 % de las alertas se responde en menos de 5 minutos, con un tiempo promedio de respuesta de 2,3 minutos y 100 % de los motivos de incumplimiento registrados.

3.4 Silvicultura: Sarapico con georeferenciamiento

Reducir la mortalidad de plantines requiere entender dónde y cuándo ocurren las reposiciones, algo que los métodos administrativos tradicionales no permiten trazar con precisión geoespacial. El uso de sarapicos con georeferenciación utilizando dispositivos GPS en campo que registran automáticamente ubicación y momento de cada planta puesta, integrados con una plataforma SIG (ArcGIS), y aplicando técnicas de *Machine Learning* clásico como PCA, K-Means se pueden encontrar patrones para relacionar pendiente y ubicación con las reposiciones, además de identificar zonas de mayor concentración de errores.

3.5 Cosecha — HPR Dashboard (SmartHarvest)

El análisis de producción de cosecha (volumen, calidad, rendimiento) es hoy manual y lento, y las caídas de rendimiento se detectan con demora. Este tablero interactivo, en producción y de uso



operativo diario, consolida los reportes de las cosechadoras e incorpora un agente conversacional basado en LLM que redacta automáticamente los partes diarios y semanales, responde preguntas en lenguaje natural sobre los datos y da seguimiento geoespacial por operador y máquina. Reduce de horas a minutos el análisis de producción diaria y detecta automáticamente desvíos de calidad por operador.

3.6 Extracción de madera y Caminería. CompassForest

El cálculo de la distancia de extracción de madera, que define el pago a las empresas de extracción de madera, se realiza hoy manualmente con SIG y personal calificado, de forma lenta y subjetiva, con el agravante de terrenos sin caminería tradicional. CompassForest es una plataforma web (webGIS, arquitectura cloud) que optimiza rutas de extracción hasta el borde de camino y genera microplanificación de cosecha, aplicando visión por computadora para estimar el ángulo de plantación y algoritmos de optimización sobre datos georreferenciados. Ya consolidado como producto comercial en el mercado local y en escalamiento internacional, estima un ahorro de 20-25 % en costos logísticos de extracción, del orden de US\$1 por metro cúbico extraído, con un impacto potencial estimado de más de 10 millones de m³/año a escala país.

3.7 Planeamiento. SmartHarvest Geodatos

La digitalización de gabinete SIG para planificación es un trabajo manual y lento, y los datos árbol a árbol que genera la cosecha rara vez se aprovechan para planificar el próximo ciclo. Esta plataforma, en producción, toma los datos de producción de cosecha y un shapefile de rodales para generar automáticamente ocho capas geoespaciales (un shapefile de puntos y siete rasters de volumen, VMI, factor de forma, DAP, altura, entre otros) mediante geoprocésamiento e interpolación espacial en grillas de 30×30 m, compatibles con QGIS, ArcGIS y Google Earth Engine. La cartografía de productividad queda lista en minutos en lugar de días de trabajo de gabinete.

3.8 Planeamiento. Cartografía mediante segmentación de imágenes

La digitalización manual de los límites de rodal es lenta y depende del criterio del operador. Este proyecto piloto automatiza la delimitación de rodales a partir de imágenes aéreas o satelitales, separando el dosel forestal de pasturas, caminos y suelo, mediante modelos de segmentación SAM (Segment Anything, Meta AI, versiones 2.1 y 3) integrados a QGIS por un plugin especializado, con interacción por clics sobre puntos de interés. Completada la comparación de modelos el siguiente paso es consolidar los polígonos y reentrenar el modelo con datos propios.

3.9 Sanidad Forestal. Trampas Inteligentes

El monitoreo de plagas por inspección manual es costoso, lento y poco escalable, en un contexto donde el cambio climático hace los brotes más frecuentes e impredecibles y la defoliación severa puede reducir hasta 50 % el crecimiento anual del árbol. En articulación con un instituto nacional de investigación agropecuaria, este proyecto de I+D de 24 meses valida en campo trampas con atracción por feromonas y luz, captura mecánica no destructiva, reconocimiento automático de insectos por IA procesado en el propio dispositivo, conectividad IoT y autonomía solar, junto con una plataforma en la nube que cruza clima con modelos fenológicos para anticipar brotes. En etapa de validación de campo, el modelo se reentrena para una plaga nueva con solo 30 a 50 imágenes, y una sola visita mensual alcanza para el mantenimiento de la trampa.

3.10 Control de Procesos. Tableros y Alertas en empresas de servicios

El seguimiento de tareas de campo suele vivir disperso en planillas sin alertas, y no siempre es viable instalar software técnico en los equipos del cliente. Este caso se diferencia de los anteriores: aquí la IA generativa fue el medio para construir la herramienta, no el modelo final entregado. Se trata de un tablero HTML generado automáticamente desde una planilla simple, con alertas por Telegram según criticidad y proximidad de vencimiento, que recoge las respuestas en un loop cerrado de retroalimentación. Corre mediante tareas programadas de Windows, sin servidores externos ni



instalación de Python, empaquetado en un ejecutable con costo recurrente cero para el cliente, aplicable a cualquier proceso de la cadena forestal.

3.11 Lectura transversal

Los diez casos muestran una progresión de madurez heterogénea de proyectos de I+D en validación (Trampas Inteligentes, Rodalización automática) a productos ya comerciales (CompassForest) y un uso diferenciado de técnicas según el problema: machine learning clásico y visión por computadora donde se requieren métricas auditable (detección de enfermedades, estimación de distancias), y modelos de lenguaje donde la tarea es de síntesis, redacción o interacción conversacional (PlanifiKER.IA, HPR Dashboard, SilviOK). Ningún caso reemplaza el juicio experto: la IA generativa puede alucinar, no tiene acceso a datos en tiempo real ni al contexto propietario de la empresa, por lo que su aporte es mayor cuanto más acotado y verificable es el problema al que se aplica.

4. CONCLUSIONES

Los diez casos presentados muestran que la inteligencia artificial ya está generando valor verificable en distintas etapas de la cadena forestal, desde el vivero hasta el control de procesos, cuando se aplica a problemas concretos, medibles y bien definidos. La experiencia acumulada respalda un criterio de selección deliberado (análogo a un raleo) antes que una adopción indiscriminada: identificar los pocos casos donde la tecnología libera tiempo real o reduce un riesgo operativo, y descartar el resto. La combinación de *machine learning* clásico, visión por computadora, modelos de lenguaje y dispositivos IoT, elegida según la naturaleza de cada problema, resulta más productiva que la búsqueda de una solución única de IA para toda la cadena de producción.

5. LITERATURA CITADA

ADAVIV. s. f. AI-powered crop quality and farm operations management platform. Adaviv, Estados Unidos. Disponible en: <https://www.adaviv.com/>.

BUCHELT, A.; ADROWITZER, A.; KIESEBERG, P.; GOLLOB, C.; NOTHDURFT, A.; ERESHEIM, S.; TSCHIATSCHEK, S.; STAMPFER, K.; HOLZINGER, A. 2024. Exploring artificial intelligence for applications of drones in forest ecology and management. *Forest Ecology and Management* 551, 121530. Enlace: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121530>

FAO. Estimaciones de pérdidas agrícolas anuales asociadas a plagas y enfermedades.

MIT SLOAN MANAGEMENT REVIEW. Reporte sobre inversión empresarial en IA interna en EE. UU. (USD35.000 a 40.000 millones) y retorno medible obtenido.

RAMALINGAM, B.; MOHAN, R. E.; POOKKUTTATH, S.; GÓMEZ, B.F.; SAIRAM BORUSU, C. S.C.; WEE TENG, T.; TAMILSELVAM, Y.K. 2020. Remote insects trap monitoring system using deep learning framework and IoT. *Sensors*, 20(18), 5280. Enlace: <https://doi.org/10.3390/s20185280>

TERASEYA. s. f. Teraseya Fly: real-time pest insect monitoring. Teraseya, Timișoara, Rumania. Disponible en: <https://teraseya.com/>



LA ENERGÍA POTENCIANDO LA ACTIVIDAD FORESTAL

Andrés ROTZEN¹, Jorge NARCIZO²

RESUMEN

El presente trabajo describe la experiencia de FRESA y CTSA en la integración entre el abastecimiento de biomasa forestal y la generación de energía eléctrica renovable en el nordeste argentino. Se analiza el desarrollo de la cadena de abastecimiento, la logística, el control de calidad del combustible y el proceso industrial de generación implementado en las centrales CTSA y CTG. La metodología se basó en el análisis de registros operativos internos correspondientes al período 2019–primer semestre de 2026. Los resultados muestran la consolidación de una red regional de proveedores, el crecimiento sostenido de los volúmenes de biomasa y el aporte de 80 MW de potencia instalada al Sistema Argentino de Interconexión. Se concluye que la valorización energética de la biomasa fortaleció la cadena foresto-industrial, promoviendo inversiones, empleo y desarrollo regional.

Palabras clave: *Abastecimiento forestal; economía circular; valorización de biomasa; desarrollo regional; generación eléctrica*

1. INTRODUCCIÓN

El contenido original del informe se mantiene a continuación con adecuaciones de formato y estructura conforme al reglamento de las XL Jornadas Forestales de Entre Ríos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un estudio descriptivo utilizando registros operativos internos de FRESA y CTSA correspondientes al período 2019–primer semestre de 2026. Se analizaron indicadores de abastecimiento, composición de biomasa, logística, generación eléctrica y datos técnicos de las centrales CTSA y CTG. Los resultados se presentan mediante cuadros y gráficos elaborados a partir de dicha información.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Fuentes Renovables de Energía S.A. (FRESA) y Central Térmica San Alonso S. A. (CTSA) operan dos centrales termoeléctricas a biomasa forestal en Gobernador Virasoro, provincia de Corrientes, la Central Térmica Garruchos (CTG) y la Central Térmica San Alonso (CTSA) correspondientemente, con una potencia instalada conjunta de 80 MW. Desde su puesta en marcha, ambas centrales convierten en energía eléctrica los subproductos forestales generados por la industria maderera de la región y la actividad forestal que parte se destina a la exportación, dentro del Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes de Energías Renovables (Ley 26.190).

Este trabajo recorre ese proceso en dos etapas complementarias. La primera describe el abastecimiento de biomasa, el vínculo que conecta al bosque y a la industria forestal con la central. La segunda describe el proceso operativo de generación, desde la preparación del combustible hasta la energía entregada a la red, y el aporte que ese proceso representa para la disponibilidad energética de la región.

El abastecimiento de biomasa: el vínculo entre el bosque y la generación de energía

1 La biomasa forestal como oportunidad para el desarrollo regional

¹ Central Termica San Alonso S.A. Gerente de Abastecimiento

² Fuentes Renovables de Energía S.A. (FRESA). Gerente de Operaciones



La región nordeste de Argentina concentra una de las principales cuencas forestales del país, sustentada principalmente por plantaciones de pino y eucalipto y una industria de transformación de la madera en constante crecimiento. Como resultado de esta actividad se generan importantes volúmenes de subproductos y residuos forestales que constituyen una fuente renovable de biomasa con potencial para la generación de energía.

La puesta en marcha de FRESA (2019 y posteriormente CTSA (2025) incorporaron nuevos actores dentro de esta cadena productiva, centrales termoeléctricas con capacidad para consumir biomasa de manera continua durante todo el año. La existencia de una demanda estable permitió ampliar las alternativas de aprovechamiento de materiales provenientes tanto de la industria forestal como de los aprovechamientos silvícolas, promoviendo una mayor integración entre los distintos eslabones de la cadena.

En este contexto, la biomasa dejó de ser considerada únicamente un subproducto de la actividad forestal para convertirse en un recurso estratégico capaz de generar energía renovable y agregar valor a la producción regional.

2 Construcción de una red regional de abastecimiento

El abastecimiento de biomasa constituye uno de los pilares fundamentales para garantizar la operación continua de una central termoeléctrica. A diferencia de otros combustibles, la biomasa presenta una elevada variabilidad en cuanto a origen, características físicas, contenido de humedad y disponibilidad estacional, lo que exige una planificación permanente y una estrecha coordinación entre todos los actores involucrados.

Con el objetivo de asegurar un suministro confiable, las centrales termoeléctricas desarrollaron una red regional integrada por empresas forestales, aserraderos, productores independientes, contratistas especializados y empresas de transporte. Esta red permite abastecer a las centrales con diferentes tipos de biomasa provenientes principalmente de Corrientes y Misiones, manteniendo un adecuado equilibrio entre disponibilidad, calidad y costo logístico.

Las principales materias primas utilizadas corresponden a:

- Chip proveniente de la industria forestal o procesos de chipeo en campos.
- Aserrín proveniente de la industria forestal o procesos de chipeo en campos.
- Corteza proveniente de la industria forestal o procesos de chipeo en campos.
- Biomasa triturable obtenida de raleos y aprovechamientos forestales

Cada uno de estos materiales aporta características particulares en cuanto a humedad, granulometría y densidad, por lo que la estrategia de abastecimiento debe garantizar no solo volumen, sino también una mezcla compatible con las necesidades del proceso de generación.

3 La logística como factor estratégico

La logística representa uno de los principales desafíos dentro de la cadena de abastecimiento de biomasa. Debido a su baja densidad energética, el transporte constituye una parte significativa del costo total del combustible, haciendo indispensable una planificación eficiente de los flujos de ingreso.

El sistema desarrollado por FRESA y CTSA comprende la programación diaria de cargas, coordinación de transportistas, recepción de materiales, controles de calidad, pesaje, almacenamiento y distribución interna hacia las áreas de consumo. En condiciones de plena operación, la red logística moviliza aproximadamente cien camiones por día y alrededor de cien mil toneladas mensuales de biomasa, articulando el trabajo de una amplia red de proveedores y prestadores de servicios dentro de un radio operativo cercano a los cien kilómetros.

El desafío no consiste únicamente en transportar biomasa, sino en garantizar que el combustible llegue en el momento oportuno, con las condiciones de calidad requeridas y a un costo competitivo. La coordinación permanente entre abastecimiento, logística y operación permite reducir la exposición a



factores externos como las condiciones climáticas, la estacionalidad de las cosechas y las variaciones de disponibilidad de los distintos materiales.

4 Calidad de la biomasa como condición para una generación eficiente

La calidad del combustible constituye un aspecto determinante para el desempeño operativo de la central. Por esta razón, la biomasa recepcionada es sometida a controles destinados a verificar parámetros tales como contenido de humedad, granulometría, presencia de impurezas y trazabilidad del material.

Estos controles permiten clasificar los diferentes tipos de biomasa y optimizar la conformación de mezclas que aseguren un comportamiento homogéneo durante el proceso de combustión. La interacción permanente entre las áreas de Abastecimiento y Operaciones resulta fundamental para adaptar la estrategia de compra, recepción y acopio a las necesidades del proceso industrial, contribuyendo a mejorar la eficiencia energética y la estabilidad operativa de la planta.

5 Evolución del abastecimiento de biomasa

Desde el inicio de las operaciones en 2019 y hasta el cierre del primer semestre de 2026, esta gestión evidenció una evolución significativa en los volúmenes de biomasa incorporados a su proceso de generación. El crecimiento observado refleja no solamente el desarrollo operativo de la central, sino también la progresiva consolidación de una cadena regional de abastecimiento.

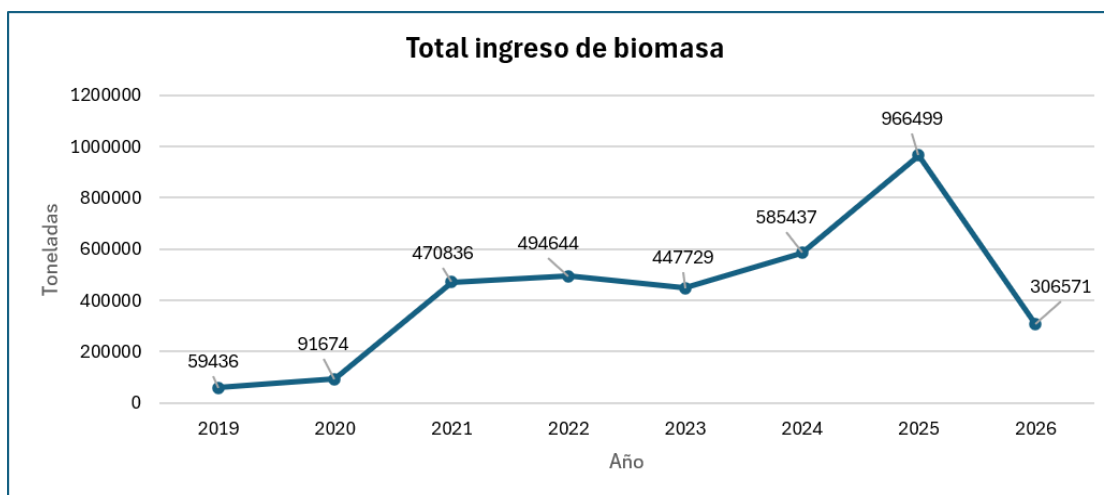


Figura 1. Evolución anual de la biomasa ingresada a FRESA y CTSA desde 2019 hasta el cierre del primer semestre de 2026.

La evolución anual evidencia la ampliación progresiva de la capacidad de abastecimiento y la consolidación de la red de proveedores, contratistas y transportistas necesaria para acompañar las necesidades de la operación. El máximo volumen anual registrado en 2025 permite dimensionar el grado de madurez alcanzado por el sistema y la magnitud de la demanda de biomasa generada por el proyecto.

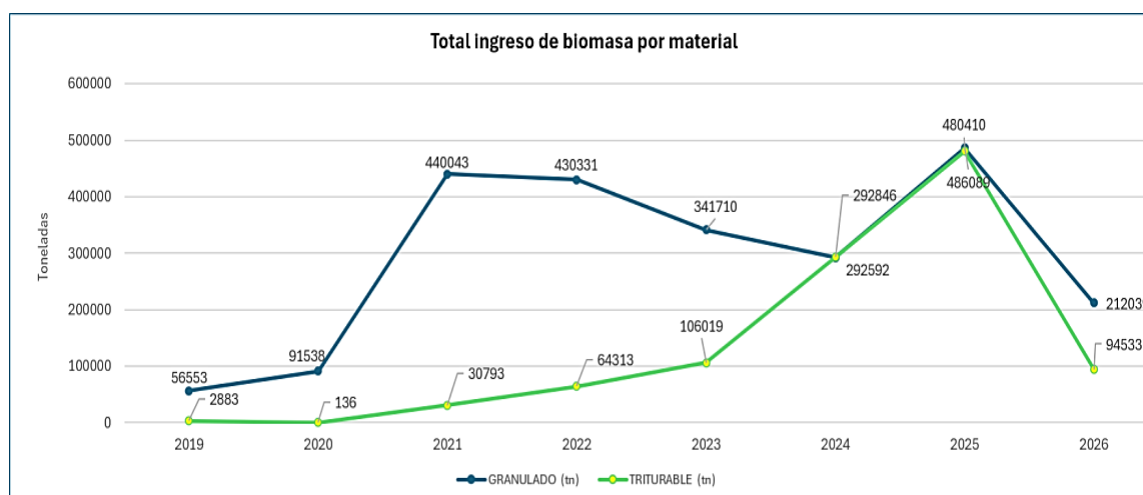


Figura 2. Evolución anual de la composición del abastecimiento según biomasa proveniente de industria o procesos de chipeco en campos y material triturable proveniente de la actividad de la cosecha (2019, primer semestre de 2026).

La composición del abastecimiento también muestra una transformación del sistema. A medida que la operación se consolidó, aumentó la participación del material triturable proveniente de aprovechamientos forestales, así como también de procesos de chipeco en campos, complementando el abastecimiento de biomasa granulada generada por la industria de transformación de la madera. Esta diversificación permitió ampliar las fuentes de suministro y aumentar la capacidad de adaptación frente a las condiciones del mercado forestal y a los requerimientos operativos de la central.

6 El abastecimiento como motor del desarrollo foresto-industrial

Más allá de garantizar el suministro de combustible para la generación eléctrica, uno de los principales aportes del proyecto fue la consolidación de una cadena de valor alrededor de la biomasa forestal. La demanda permanente permitió ampliar las alternativas de valorización de materiales provenientes tanto de la industria como de los aprovechamientos forestales, generando nuevas oportunidades comerciales para productores, empresas forestales y aserraderos.

Este nuevo escenario impulsó inversiones en maquinaria de cosecha, equipos de trituración y chipecado, infraestructura de acopio, transporte especializado y mejoras en los procesos asociados al acondicionamiento y movimiento de biomasa. Asimismo, favoreció el desarrollo de empresas contratistas y prestadores de servicios vinculados al mantenimiento, combustibles, talleres y asistencia técnica, fortaleciendo el entramado productivo regional.

En este sentido, el abastecimiento dejó de ser únicamente una actividad de compra y logística para convertirse en un factor de integración entre el sector forestal y el sector energético. La existencia de una demanda industrial estable contribuyó a profesionalizar la gestión de la biomasa, incorporar nuevos actores y desarrollar capacidades que hoy forman parte del funcionamiento habitual de la cadena foresto-industrial regional.

7 Del bosque a la energía

Cada tonelada de biomasa recepcionada representa el resultado del trabajo coordinado de productores forestales, industrias, contratistas y transportistas que participan de una misma cadena de valor. El sistema de abastecimiento constituye el nexo entre el recurso forestal y el proceso industrial de generación, asegurando que la biomasa llegue con las condiciones de calidad y continuidad requeridas para su transformación en energía eléctrica renovable.

De esta manera, el abastecimiento se convierte en el primer eslabón de un proceso que no solo produce electricidad, sino que también promueve inversiones, empleo, innovación y desarrollo para toda la



actividad foresto-industrial. Una vez asegurado el suministro de biomasa con las condiciones requeridas, comienza la etapa industrial de transformación energética, desarrollada a continuación.

El proceso operativo: de la biomasa a la energía en la red

1 Preparación del combustible y mezcla de biomasa

Una vez recibida en planta, la biomasa pasa por un control de calidad específico para el proceso de combustión, que define dos variables críticas para el rendimiento de la caldera, la humedad y la granulometría.

La humedad debe mantenerse por debajo del 52 %, límite de diseño de la grilla vibratoria (tecnología Hydrograte®), preparada específicamente para la combustión eficiente de biomasa húmeda como chip y mezclas de aserrín y corteza. Por encima de ese umbral, la caldera destina una porción proporcional de la energía de combustión a evaporar el agua contenida en la madera antes de poder aprovecharla, lo que reduce el rendimiento térmico y compromete la estabilidad de la llama.

La granulometría se controla para lograr una combustión uniforme sobre la grilla y evitar tanto el arrastre excesivo de partículas finas, como la presencia de partículas demasiado grandes que retrasan la combustión completa.

La mezcla de combustible se define con un límite de hasta 70 % de chip y 30 % de aserrín. Esta proporción no es arbitraria, ya que el aserrín, por su menor granulometría, favorece la combustión instantánea, pero en exceso compromete la fluidez del transporte y la distribución homogénea sobre la grilla.

Una vez validada la calidad, el combustible se acopia y se alimenta de forma continua a la caldera a través de un sistema de cintas transportadoras y dosificadores automáticos, diseñado para sostener el abastecimiento incluso ante eventuales inconvenientes en la alimentación principal.

2 Datos técnicos de referencia (por central)

Parámetro	Valor
Potencia instalada	40 MW por central (80 MW entre CTG y CTSA)
Combustible	Biomasa forestal, chip, aserrín y raleo de eucalipto y pino
Límite de mezcla	Hasta 70 % chip / 30 % aserrín
Humedad máxima admitida	52 %
Radio de abastecimiento	Hasta 100 km
Vapor generado	160 t/h a 68 bar y 480°C
Turbina	Siemens SST-300, multietapa con extracciones y condensación, 7.020 rpm
Reductor	De 7.020 rpm a 1.500 rpm
Generador	Síncrono trifásico, 50.000 kVA, 13,2 kV, 50 Hz, 1.500 rpm
Tensión de salida a red	132 kV (transformador 13,2/132 kV, 50 MVA)
Captación de material particulado	Ciclones (60 %) + filtro de mangas (99 %), emisión máx. 120 mg/Nm ³

3 De la caldera a la energía en la red

Cada central cuenta con una caldera acuotubular de circulación natural, de un solo domo, preparada para la combustión de biomasa húmeda. La caldera genera 160 toneladas de vapor por hora, a una presión de 68 bar y una temperatura de 480°C, condiciones necesarias para que el turbogenerador entregue 40 MW eléctricos por central.



La combustión ocurre sobre una grilla vibratoria refrigerada, una tecnología que, a diferencia de las grillas fijas o basculantes tradicionales, permite eliminar impurezas del combustible sin pérdida de presión ni de capacidad durante la limpieza, ya que esta se realiza por vibración sin interrumpir la alimentación de combustible. El hogar está formado por paredes de agua membranas, que reciben el calor de los gases de combustión y lo transfieren al circuito agua vapor, eliminando la necesidad de revestimientos refractarios y su mantenimiento asociado.

A la salida de la cámara de combustión, los gases atraviesan la sección de convección, formada por el sobrecalentador y el evaporador, y luego el economizador, donde se recupera calor precalentando el agua de alimentación antes de su ingreso a la caldera. Un calentador de aire cumple una doble función, entrega aire de combustión a la temperatura requerida para quemar biomasa de alta humedad, y enfría los gases de combustión para aumentar el rendimiento térmico del conjunto. Todo el circuito agua-vapor se abastece desde un desaireador que remueve el oxígeno y el dióxido de carbono disueltos en el agua de reposición, protegiendo así la integridad de los tubos de la caldera.

El vapor sobrecalentado se conduce a la turbina Siemens SST-300, de tipo multietapa con extracciones (bleeds) y condensación, que trabaja a 65 bar y 480°C, y gira a 7.020 rpm. Un reductor de ejes helicoidales baja esa velocidad a 1.500 rpm, la velocidad de giro del generador síncrono trifásico Siemens de 50.000 kVA, que produce energía eléctrica a 13,2 kV y 50 Hz. El vapor de escape de la turbina se condensa mediante un sistema de torres de enfriamiento de tiro inducido, cerrando el ciclo termodinámico y devolviendo el agua al circuito de alimentación.

Finalmente, un transformador elevador de 13,2/132 kV y 50 MVA eleva la tensión para su inyección a la red de 132 kV a través de la estación transformadora de cada central, quedando la energía disponible para su despacho y distribución en la región. En síntesis, el proceso completo es una cadena de conversión energética que va de la energía química de la biomasa a la energía térmica, de ahí a la energía mecánica y finalmente a la energía eléctrica, sostenida por los controles de humedad y granulometría que condicionan la eficiencia de toda la cadena aguas abajo.

4 Control operativo y gestión ambiental

Todo el proceso es supervisado por un sistema de control y automatización Siemens, con un sistema SCADA que permite seguir en tiempo real variables críticas como el nivel de domo, la presión de vapor, la temperatura de gases y el estado de cada sistema auxiliar. Cada central se opera con un técnico operador y un supervisor, que siguen la operación de manera continua desde la sala de control.

Los subproductos de la combustión también reciben tratamiento específico. Las cenizas se recolectan en distintos puntos de la caldera, y hoy se están llevando adelante distintas investigaciones sobre su aprovechamiento, utilizándose ya de modo experimental como mejorador de suelos y regulador de pH. Los gases de combustión, por su parte, pasan por un sistema de captación de material particulado en dos etapas, una batería de ciclones con eficiencia del 60% y un filtro de mangas con eficiencia del 99 %, que garantiza emisiones de material particulado dentro del límite normativo.

5 El aporte de FRESA y CTSA a la región y la disponibilidad energética

Con sus 80 MW de potencia instalada entre CTG y CTSA, las empresas son actores relevantes en la matriz de generación de la región de Virasoro y su zona de influencia. Ese aporte se traduce, en primer lugar, en disponibilidad energética, energía generada de manera constante y programable, a partir de un combustible renovable y de origen local, que fortalece la confiabilidad del suministro eléctrico regional frente a la intermitencia propia de otras fuentes renovables como la eólica o la solar.

Esta estabilidad energética no es un beneficio abstracto, es una condición habilitante para el desarrollo industrial de la zona. Una región con suministro eléctrico confiable atrae y sostiene actividad industrial, en particular la propia foresto industria que provee el combustible, generando un círculo virtuoso entre la actividad forestal, la industria maderera y la generación eléctrica. La cercanía entre la fuente de combustible y la central reduce además la dependencia de la región respecto de la energía transportada desde otros puntos del sistema interconectado.



El recorrido que va del bosque a la red combina dos procesos que se sostienen mutuamente. Por un lado, una cadena de abastecimiento que conecta a productores forestales, aserraderos, contratistas y transportistas con la central, dándole valor a subproductos que antes carecían de mercado. Por otro, un proceso operativo que transforma esa biomasa en energía eléctrica firme, con control de calidad del combustible, tecnología de combustión específica para biomasa húmeda y un sistema de generación convencional de ciclo Rankine.

Juntos, ambos procesos le permiten a FRESA y CTSA aportar 80 MW de energía renovable y confiable a la región, contribuyendo tanto a la disponibilidad energética como al desarrollo de la actividad foresto industrial de la que la propia central se nutre.

4. CONCLUSIONES

Estas empresas demuestran que la integración entre el abastecimiento de biomasa y la operación de centrales termoeléctricas constituye un modelo eficiente para valorizar subproductos forestales, generar energía renovable firme y fortalecer la cadena foresto-industrial del nordeste argentino.

5. LITERATURA CITADA

CAMMESA. Informes del Mercado Eléctrico Mayorista.

Ley N° 26.190. Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía.

Ley N° 27.191. Modificación del Régimen de Fomento de Energías Renovables.

SAGyP. Tablero de Plantaciones Forestales.

FAO. Publicaciones sobre bioenergía forestal.



OPTIMIZACIÓN LOGÍSTICA EN EL TRANSPORTE FORESTO INDUSTRIAL: CASOS APLICADOS

Agustina ANSELMINO¹

1. LA CADENA DE SUMINISTRO FORESTAL Y SUS PROBLEMÁTICAS LOGÍSTICAS

La cadena de suministro (CS) forestal se organiza en etapas que abarcan desde la obtención del recurso hasta su comercialización final (Organización Internacional del Trabajo, 2019). En los bosques cultivados el proceso comienza en viveros y plantines para abastecer la demanda industrial de madera sólida y triturable. Luego comienzan las fases de primera y segunda transformación industrial. En la transformación primaria se procesa mecánicamente la madera para obtener productos como madera aserrada, y los subproductos de ese proceso tales como chips y aserrín. Estos, junto con los residuos generados durante las operaciones de poda, rales y cosecha, constituyen fuentes de biomasa forestal. Alternativamente, la madera puede transformarse químicamente en pasta celulósica para la fabricación de papel. Luego, la segunda transformación industrial implica la manufactura de bienes de mayor valor agregado como muebles, aberturas, pisos y tableros. Dichos productos se comercializan tanto al mercado interno como al externo.

La logística está presente en cada etapa y resulta determinante para la competitividad y la sostenibilidad del sector: una gestión inadecuada del transporte puede comprometer la rentabilidad de toda la CS. Las principales problemáticas logísticas pueden resumirse en cinco ejes:

- Transporte interno y acarreo: Dentro de los servicios forestales, el acarreo y transporte en el interior del bosque es una actividad que requiere maquinaria especializada y servicios de terceros (contratistas).
- Accesibilidad e infraestructura: El terreno difícil y las pendientes pronunciadas limitan el acceso de camiones grandes a los sitios de cosecha, obligando al uso de vehículos más pequeños y costosos o a la creación de centros de transferencia intermedios.
- Eficiencia de carga y densidad: Los camiones se ven limitados por el volumen (cuando el material tiene poca densidad) o por el peso (cuando tiene alta humedad), lo que reduce la carga neta.
- Sincronización operativa: Es fundamental coordinar la llegada de los camiones con la disponibilidad de equipos de carga en el bosque para evitar tiempos de espera excesivos y la infrutilización de maquinaria costosa.
- Incertidumbres externas: El transporte forestal es altamente vulnerable a interrupciones por clima extremo, cierres de caminos, averías mecánicas y variaciones imprevistas en la demanda de las plantas.

Dichas problemáticas se manifiestan con particular intensidad en la cosecha y el transporte de la materia prima forestal, lo cual se expone en la siguiente sección.

2. COSECHA Y TRANSPORTE DE MATERIA PRIMA FORESTAL

Durante las operaciones de cosecha suelen generarse una variedad de surtidos tales como madera aserrable, madera pulpable y residuos. En este esquema, la viabilidad económica de la intervención depende de la distribución conjunta de los valores de todos estos productos, y no únicamente del precio de la madera principal (Campanella et al., 2018). Dentro de los sistemas de cosecha forestal se encuentran el *Cut-to-Length* (CTL), en el cual los árboles sin procesados y cortados a las dimensiones

¹ Esp. Lic. Universidad Tecnológica Nacional, CONICET, FRCU, Concepción del Uruguay, Argentina. anselminoa@frcu.utn.edu.ar.



requeridas en el sitio de cosecha, y el *Full Tree* (FT), que contempla la extracción del árbol completo o del fuste completo para su posterior procesamiento en la industria de primera transformación. Asimismo, existen esquemas de cosecha semimecanizada, que combinan el uso de motosierra para el apeo y procesamiento con diferentes métodos de extracción y acarreo. La elección del sistema depende de las características del terreno, el tipo de producto obtenido, la tecnología disponible y las condiciones operativas de cada sitio. Los productos primarios obtenidos se clasifican tradicionalmente según su diámetro y calidad en madera aserrable, destinada a la transformación mecánica de mayor valor, y madera pulpable, generalmente fustes de menor diámetro (típicamente entre 15 y 18 cm) destinados a la producción de pulpa celulosa.

La eficiencia en el transporte es el componente más crítico de esta etapa. Se estima que la logística puede representar entre el 40 % y el 60 % del costo total del material entregado en la planta (Vitale et al., 2022). Esta carga económica se deriva de una serie de desafíos físicos y operativos. Además de la topografía, la operación debe gestionar incertidumbres como el clima extremo y la disponibilidad de caminos, que pueden interrumpir el flujo constante hacia la industria. En diversos lugares del mundo, para mitigar estos costos se recurre al secado en campo, lo que permite reducir el peso por humedad y facilitar la caída del follaje antes del traslado. La eficiencia operativa en el bosque también depende de maquinaria especializada de acarreo interno, operada habitualmente por contratistas, y de adaptaciones en los vehículos de transporte, como ejes direccionables o sistemas de compactación de carga, diseñados para maximizar la capacidad en cada viaje.

Según la modalidad de organización del transporte, pueden distinguirse esquemas de cadena caliente y cadena fría. En la cadena caliente, las trozas son transportadas inmediatamente después de la cosecha, mientras que en la cadena fría permanecen temporalmente en el sitio de cosecha antes de su traslado. La elección entre ambas modalidades depende del destino del producto, las condiciones operativas y la coordinación entre las actividades de cosecha, transporte y recepción en la industria.

Esta fase de extracción define, además, la disponibilidad de los residuos de cosecha (ramas, copas y secciones no comerciales), los cuales representan entre el 15 % y el 30 % del total del árbol (Sessions et al., 2026). La forma en que se manejen estos sobrantes durante el transporte de los productos principales determinará su calidad futura, dando paso a la necesidad de analizar estas fuentes alternativas bajo el concepto de biomasa forestal, que se desarrollará en el siguiente apartado.

3. BIOMASA FORESTAL

Actualmente, la leña constituye el principal producto forestal destinado al uso energético a nivel mundial mientras que los residuos de la cosecha, raleo y podo, así como los provenientes de la transformación industrial de la madera, constituyen fuentes de biomasa leñosa con potencial de aprovechamiento energético. No obstante, se proyecta que otras fuentes de biomasa, como los cultivos dendroenergéticos (plantaciones de rotaciones cortas destinadas exclusivamente a la producción de biomasa), contribuyan en mayor medida a la producción de biomasa para poder abastecer el mercado creciente de la bioenergía. En este contexto, el aprovechamiento de los recursos forestales disponibles requiere considerar tanto sus características físicas como las posibilidades de valorización existentes a lo largo de la cadena foresto-industrial.

Dentro de estos recursos, la madera de menor diámetro constituye una fracción cuyo destino comercial puede resultar limitado. Cuando no encuentra un mercado, puede quedar abandonada en los sitios de cosecha o ser quemada en campo. Su aprovechamiento depende de las características del material y de los mercados disponibles en cada región, por lo que no toda la biomasa generada se encuentra efectivamente disponible para su valorización. Esta fracción puede representar un recurso de interés para el aprovechamiento energético, siempre que sus características y las condiciones de la cadena de suministro permitan su recolección, acondicionamiento y utilización de manera técnica y económicamente viable.

A nivel internacional, países con gran desarrollo en el aprovechamiento de los residuos de cosecha (tales como Finlandia, Suecia, Canadá, etc.), emplean distintas tecnologías para su acondicionamiento



según las características del recurso disponible: procesos hidrotérmicos cuando la humedad es alta, secado cuando la humedad es baja, lixiviado o lavado cuando hay contaminación inorgánica, densificación o clasificación cuando hay limitaciones de tamaño, y extracción de corteza cuando su contenido es elevado. Posteriormente, a través de diferentes procesos de transformación es posible obtener desde biocarbón y combustibles sólidos hasta químicos de alto valor como taninos y suberina, y en su forma más desarrollada confluyen en esquemas de biorrefinería integrada, que buscan transformar los residuos en materias primas estandarizadas dentro de una cadena de valor circular.

Además de estas alternativas tecnológicas, la biomasa forestal enfrenta desafíos logísticos que limitan su viabilidad económica, derivados de una combinación de factores físicos del recurso, limitaciones de infraestructura y complejidades operativas:

- **Baja densidad y alta humedad:** Los residuos forestales crudos tienen una densidad muy baja (entre 80 y 250 kg/m³), lo que significa que los camiones se ven limitados por el volumen antes de alcanzar su límite de peso. Sumado a esto, el alto contenido de humedad reduce su densidad energética, elevando los costos de flete.
- **Dispersión geográfica y accesibilidad:** Las fuentes de suministro de los recursos biomásicos (principalmente montes y aserraderos) son muchas y se encuentran altamente dispersas, y en el caso de los montes, muchas veces con bajos niveles de accesibilidad o costos extremadamente altos para la recolección del material que se encuentra disperso en el campo.
- **Calidad, contaminación y granulometría:** El manejo de la biomasa durante la carga y el transporte puede introducir contaminantes inorgánicos (suelo y arena), lo que eleva el contenido de cenizas y daña los equipos de conversión, reduciendo el valor del material entregado. Dependiendo de las configuraciones de las calderas que consumen biomasa, en muchos casos admiten como máximo un 30 % de finos, y no aceptan la corteza, lo que añade una capa de complejidad al momento de su utilización con fines energéticos.
- **Degradación del material:** La naturaleza higroscópica de la madera le permite absorber y retener la humedad del ambiente. La biomasa almacenada a la intemperie por periodos prolongados sufre procesos de degradación de la materia seca, generación de hongos y pérdida de sus cualidades técnicas para la conversión energética.

En conjunto, estos factores evidencian que la disponibilidad de biomasa forestal no depende únicamente de la cantidad de material generado, sino también de sus características, localización, accesibilidad, calidad y posibilidades de inserción en los mercados existentes. Por ello, el aprovechamiento de estos recursos requiere analizar de manera integrada las condiciones de suministro, acondicionamiento transporte y utilización a lo largo de la cadena foresto-industrial. La Figura 1 sintetiza esta estructura y las principales alternativas para el aprovechamiento de la biomasa forestal.

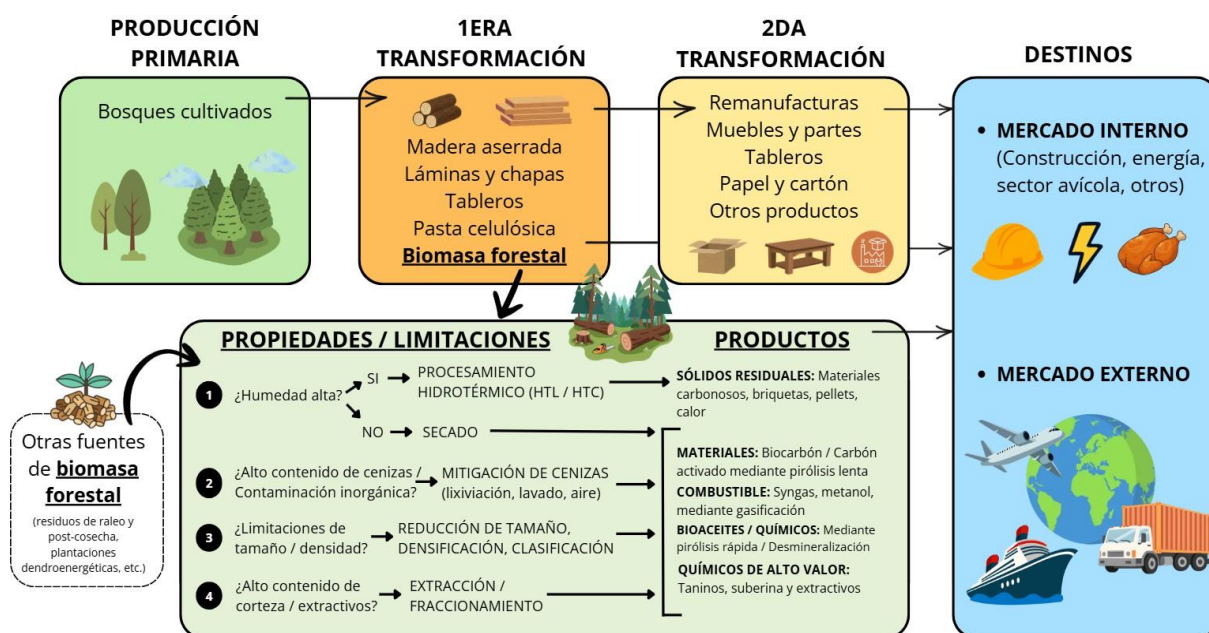


Figura 1. Estructura de la cadena foresto-industrial, con alternativas para el aprovechamiento de la biomasa. Fuente: Adaptación propia en base a OIT (2019) y Sessions et al. (2026).

4. CONTEXTO DE LA BIOMASA FORESTAL EN ENTRE RÍOS

En la región Mesopotámica de Argentina, la cual concentra cerca del 80 % de las plantaciones forestales de todo el país, dichos desafíos logísticos tienen un gran impacto debido a la magnitud de su base forestal y a la relevancia creciente de la biomasa como recurso energético. Particularmente, la provincia de Entre Ríos cuenta con unas 130.000 hectáreas forestadas, lo que representa aproximadamente el 10 % de la superficie implantada a nivel nacional. La actividad forestal en esta provincia se localiza de manera intensiva en una franja aproximada de 30 kilómetros de ancho sobre la costa del Río Uruguay, abarcando una extensión de unos 200 kilómetros de longitud que atraviesa principalmente los departamentos de Federación, Concordia y Colón. En este territorio, el cultivo predominante es el *Eucalyptus grandis*, que representa el 90 % de la superficie forestada, y se estima que la provincia posee un potencial de expansión forestal de entre ocho y diez veces su área plantada actual en tierras aptas que no compiten con la producción de alimentos.

En Entre Ríos, además de los destinos asociados a la producción madera aserrada y pasta celulósica, existe un mercado de madera redonda y de madera destinada a impregnación, que incluye productos como varas, tijeras, rodrgones, tutores y postes. Estos mercados permiten también el aprovechamiento de madera de menor diámetro, particularmente aquella que presenta características adecuadas para su comercialización como madera fina pelada. En consecuencia, una proporción importante de la madera generada durante las operaciones forestales encuentra algún destino comercial, quedando como potencial residuo principalmente aquella fracción de diámetro muy reducido que no resulta aprovechable para los mercados existentes.

Los aserraderos presentan una eficiencia de transformación primaria relativamente baja, convirtiendo más del 50 % del volumen de madera ingresada en subproductos como aserrín, chips y costaneros. Esta baja eficiencia operativa genera una oferta masiva de biomasa residual que históricamente ha sido subutilizada, pero que ya hace un tiempo representa un recurso estratégico de casi 719.000 toneladas anuales. En un relevamiento realizado en el 2025 se registró una muestra para la costa del Río Uruguay, de 89 aserraderos operativos (la mayoría categorizados como “medianos”), de los cuales 52 se encuentran en el departamento de Concordia, 32 en Federación y 5 en Colón, generando 870 empleos directos. La logística se ve favorecida por una red vial pavimentada con niveles de accesibilidad superiores al 70 % hacia las fuentes de suministro, aunque el costo del transporte sigue siendo el



componente más crítico para la viabilidad de cualquier proyecto. Se estima que un 15,4 % de la biomasa forestal generada (unas 110.778 toneladas anuales) no se comercializa, representando un excedente disponible para nuevos proyectos. Históricamente, los consumidores principales en la provincia fueron empresas productoras de tableros de fibras y partículas. También, dado que el sector avícola es muy importante en la región, se ha utilizado principalmente virutas y aserrín como cama para las aves.

Actualmente, el panorama está cambiando debido a que el sector avícola está reemplazando sus calderas de Gas Licuado de Petróleo (GLP) a biomasa forestal. Se debe tener en cuenta que la provincia de Entre Ríos se encuentra en primer lugar en cuanto a la faena de aves, representando el 50,7 % del total faenado a nivel nacional durante el año 2024 (Gobierno de Entre Ríos, 2024). En valores concretos, una empresa avícola de la región tiene una caldera alimentada a chips de madera en su planta de faena, que consume en promedio 1.500 t/mes, y 18 hornos de calefacción a pellets en galpones de pollos, cuyo consumo estimado es de 45 t/mes en invierno; además, tienen un proyecto de caldera a pellets en otra planta, que consumiría 50 t/mes. Cabe mencionar que el pellet utilizado se compra en la provincia de Corrientes. Por otro lado, otra empresa avícola tiene un proyecto de caldera que consumirá aproximadamente 6.990 t/mes. Considerando este panorama, es evidente la necesidad de desarrollar nuevas fuentes de biomasa forestal para poder abastecer la demanda creciente del mercado.

Por lo previamente mencionado, resulta relevante analizar la viabilidad para el desarrollo de nuevos proyectos o líneas de negocios desde una visión integral, donde se consideren aspectos económicos, logísticos, forestales y operativos. Para ello, toman un rol importante las herramientas computacionales basadas en datos, orientadas a dar soporte en la toma de decisiones y en la planificación logística.

5. HERRAMIENTAS ANALÍTICAS PARA LA PLANIFICACIÓN LOGÍSTICA

Frente a este panorama, para facilitar la planificación a corto, mediano y largo plazo, optimizar las operaciones y reducir los costos logísticos asociados, desde el Grupo de Investigación en Inteligencia Computacional y Optimización de Sistemas (GIICOS) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay (UTN FRCU), trabajamos en el desarrollo de herramientas computacionales orientadas a resolver diversos problemas logísticos de la foresto-industria. En ese contexto, hemos colaborado con otros grupos de investigación que trabajan en temas similares en Santa Fe, Misiones y Córdoba. Incluso actualmente tenemos en ejecución un proyecto con investigadores de la UTN F.R. Concordia, titulado "Inteligencia Computacional aplicada a la Foresto-Industria".

En particular, diseñamos herramientas basadas en optimización matemática y análisis de datos que permiten transformar la complejidad de la cadena de valor forestal en información confiable para apoyar la planificación y la toma de decisiones. Estas herramientas integran las múltiples restricciones operativas y de capacidad que caracterizan al sector, junto con las variables de decisión que determinan la configuración más eficiente de los procesos. Su objetivo puede ser maximizar el Valor Actual Neto (VAN) o minimizar los costos operativos totales, garantizando al mismo tiempo la factibilidad operativa y la rentabilidad económica de las actividades forestales e industriales.

Además, hemos trabajado con técnicas de pronóstico y análisis de series temporales, para proyectar los precios del mercado de los subproductos forestales con un año de antelación. Esto permite a los actores del sector anticipar la volatilidad del mercado y tomar decisiones informadas sobre el aprovisionamiento de materia prima en un entorno de alta incertidumbre. Las herramientas tienen la capacidad de definir las "biocuencas", es decir, áreas geográficas donde el transporte de la biomasa forestal es técnica y económicamente viable, garantizando así que los proveedores obtengan ingresos bajo un esquema de precio *netback* (que considera el precio que el consumidor está dispuesto a pagar, restando los costos de transporte y procesamiento).

Para los empresarios y el sector privado, estas herramientas actúan como un sistema de apoyo a la inversión y a la planificación. Permiten evaluar el punto de equilibrio donde la generación de bioenergía o biocombustibles se vuelve competitiva frente a otras industrias de mayor valor agregado (como los



tableros, la pasta celulósica, entre otros). También permite negociar contratos de suministro a largo plazo basados en proyecciones de disponibilidad y precio, evitando paradas de planta por falta de recursos.

Desde la perspectiva del gobierno y los organismos públicos, nuestros trabajos proporcionan un marco sólido para el diseño y evaluación de políticas energéticas. Se pueden utilizar estos modelos para medir el impacto real de los subsidios o incentivos a las inversiones en la competitividad del sector y para alinear los proyectos regionales con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente en lo que respecta a energía limpia, crecimiento económico rural y acción climática.

Finalmente, para las cooperativas y comunidades locales, la optimización logística ayuda a formalizar y valorizar los residuos forestales que históricamente se desperdician o se queman a cielo abierto, transformándolos en un recurso estratégico que genera empleo genuino y desarrollo industrial sostenible en las economías regionales.

6. CASOS APLICADOS

A continuación, se presentan los principales casos de estudio donde se aplicaron las herramientas descriptas, centrados mayoritariamente en la región Mesopotámica y la provincia de Entre Ríos, ordenados desde lo operativo hacia lo estratégico.

a. Aplicación para la venta de subproductos forestales. El propósito central de esta herramienta es ayudar al productor a decidir el mejor destino para cada uno de sus subproductos (aserrín, chips o rollizos) con el fin de obtener la mayor rentabilidad posible, analizando de forma integrada el precio ofrecido por cada comprador y el costo logístico de llegar hasta él. El cálculo se basa en el margen por tonelada: al precio de venta se le resta el flete (distancia por costo específico según el subproducto) y los gastos de procesamiento, cuando corresponden. La aplicación ordena a los compradores de mayor a menor margen de ganancia y asigna el volumen disponible al destino más rentable hasta cubrir su demanda, avanzando al siguiente comprador solo si el margen sigue siendo positivo, y determina la distancia máxima rentable a partir de la cual el transporte consume toda la ganancia potencial.

b. Optimización integral y rutas de distribución para pellets (Vitale et al., 2022). Este trabajo analizó la integración de los procesos de aprovisionamiento, producción y distribución de una planta de pellets en la Mesopotamia argentina mediante un procedimiento de descomposición en dos etapas, que coordina el diseño de rutas óptimas desde los aserraderos hacia la planta de conversión y desde esta hacia los principales centros de consumo, junto a la planificación de producción e inventarios (modelo de Programación Lineal Entera Mixta, MILP). El estudio determinó el costo de una tonelada de pellets a la salida de la planta y en cada punto de consumo. La estructura de costos está dominada por la logística: la distribución hacia los centros de consumo representa el 46 % del costo total, frente al 28 % del aprovisionamiento de materia prima y el 26 % de la producción en planta. Además, el estudio permitió demostrar que las rutas de múltiples paradas (visitando varios aserraderos en un mismo viaje) son más eficientes que los viajes directos, permitiendo estimar costos competitivos por tonelada puesta en planta.

c. Competencia de mercado y formación de precios (con base en Anselmino et al., 2026). Este estudio abordó la competencia por el recurso entre la industria energética y sectores de mayor valor agregado (tal como se observa en la Figura 2), como la fabricación de tableros de fibras y partículas, incorporando la entrada de nuevos actores al mercado, representada por la migración del sector avícola de sus calderas a GLP hacia biomasa. Mediante un modelo de Programación Cuadrática Entera Mixta (MIQP) combinado con técnicas de pronóstico y de series temporales, se integró el precio de comercialización de los productos de los aserraderos como variable de decisión para analizar cómo reacciona el mercado ante el ingreso de nuevos consumidores. Se observó que la entrada de nuevos actores reduce la discontinuidad de la demanda y mejora los ingresos de los proveedores, pero genera demanda insatisfecha si no se desarrollan nuevas fuentes de suministro.

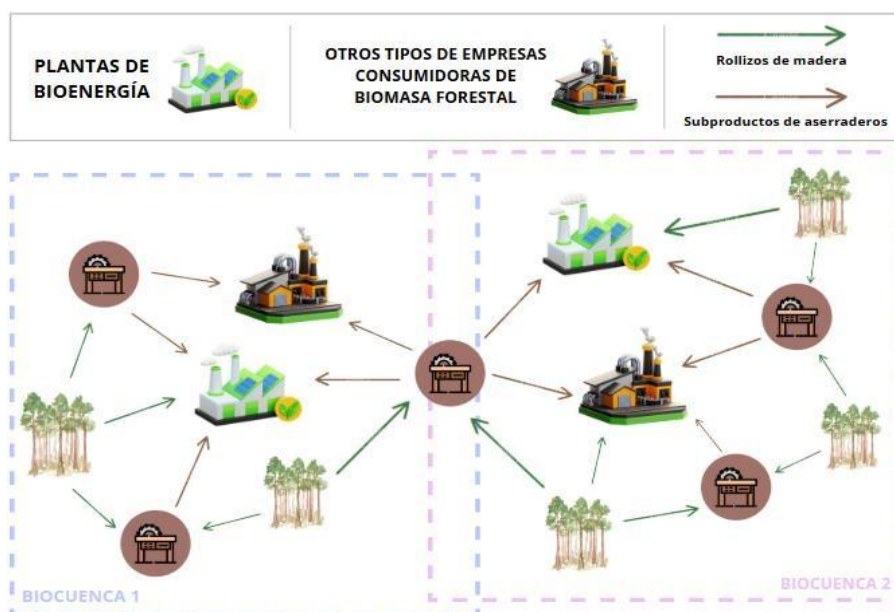


Figura 2. Estructura de la cadena de suministro de la biomasa forestal analizada en Anselmino et al. (2026)

d. Desarrollo de plantaciones dendroenergéticas y factibilidad de plantas de bioenergía (Anselmino et al., 2025). Este estudio utilizó un modelo MILP para optimizar simultáneamente el diseño de la red logística para la cogeneración de energía térmica y eléctrica a partir de biomasa forestal obtenida tanto desde plantaciones dendroenergéticas como desde aserraderos (según el esquema presentado en la Figura 3). Se evaluaron 11 alternativas tecnológicas de conversión y 54 escenarios alternativos de funcionamiento. La opción más rentable resultó ser una planta de cogeneración de 3 MW en Concordia, abastecida con una mezcla de 89 % subproductos de aserradero y 11 % biomasa de cultivos dendroenergéticos, recolectados en un radio de 90 km. Se determinó que el costo de producción de una tonelada de biomasa duplica el precio de adquisición de subproductos de aserraderos. Con una producción anual de 23.914 MWh eléctricos y 156.243 MWh térmicos, el proyecto recupera la inversión en 14 años. El análisis mostró que la viabilidad económica depende críticamente de la demanda de energía térmica de industrias cercanas y de los precios a la bioenergía definidos en licitaciones (como RenMDI). Además, estos proyectos contribuyen directamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

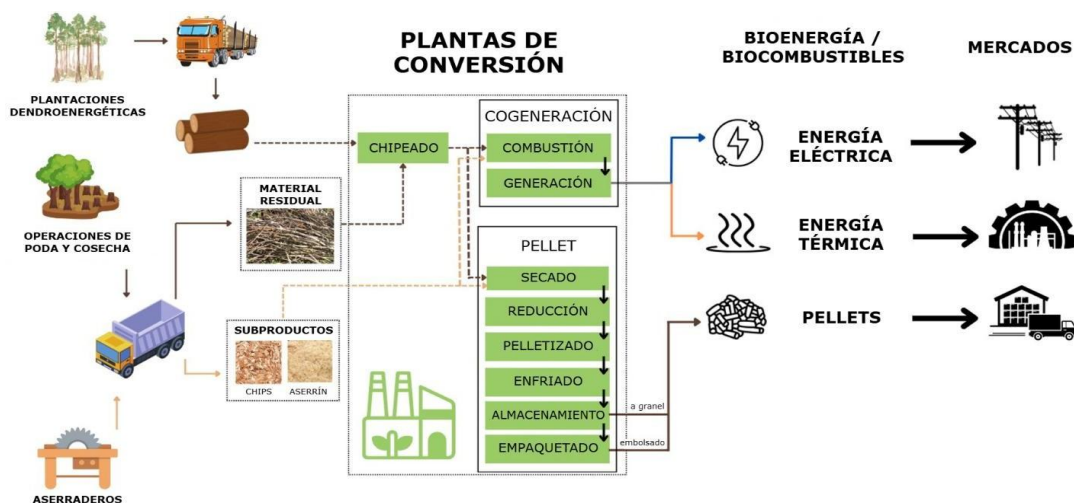


Figura 3. Estructura de la cadena de suministro de la biomasa forestal analizada en Anselmino et al. (2025)



e. Trabajo en curso: Aprovechamiento de los residuos forestales poscosecha. Se encuentra en desarrollo una herramienta para analizar la viabilidad de recolectar residuos de tala rasa o raleos no comerciales, con el fin de chipearlos a campo o empaquetarlos para su uso en calderas. El modelo evaluará la conveniencia de almacenamientos intermedios (que permitan trayectos cortos desde el campo hasta los mismos, y luego trayectos con mayor volumen hasta la planta de conversión) y la posibilidad de secado en campo para reducir la humedad sin que el material se degrade. Se espera que la herramienta indique si conviene instalar almacenes intermedios, qué capacidad y trayectos recomendar para los camiones, el momento óptimo de recolección de la biomasa en campo, la tecnología de procesamiento a emplear y las cantidades a transportar en función de la demanda de la planta. En línea con lo planteado, hemos realizado un convenio con el Aserradero Papi S.R.L. donde el objetivo es relevar la biomasa que queda en campo poscosecha, y luego analizar qué alternativas pueden ser técnica y económicamente viables para su utilización.

En conjunto, estos casos evidencian que la disponibilidad de información y de modelos cuantitativos resulta clave para transformar los desafíos logísticos descritos en oportunidades concretas de desarrollo regional, fortaleciendo la competitividad y la sostenibilidad de la cadena foresto-industrial.

7. LITERATURA CITADA

- ANSELMINO, A., DONDO, R. G., & CÓCCOLA, M. E. 2026. Optimización de precios de la biomasa forestal y su impacto en la competitividad del sector bioenergético. *SADIO Electronic Journal of Informatics and Operations Research*, 25(1), e100. <https://doi.org/10.24215/15146774e100>
- ANSELMINO, A., PIEDRA-JIMENEZ, F., RODRIGUEZ, M. A., DONDO, R. G. Y CÓCCOLA, M. E. 2025. Strategic optimization of short-rotation woody crops for bioenergy production. *Biomass and Bioenergy*, 195, 107686. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107686>
- CAMPANELLA, S., CORSANO, G., & MONTAGNA, J. M. 2018. A modeling framework for the optimal forest supply chain design considering residues reuse. *Sustainable Production and Consumption*, 16, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.06.003>
- GOBIERNO DE ENTRE RÍOS. 2024. Informe del sector avícola. Dirección General de Estadística y Censos – Ministerio de Hacienda y Finanzas de Entre Ríos. <https://www.entrerios.gov.ar/dgec/wp-content/uploads/2025/09/Sector-Avicola-Ano-2024.pdf>
- ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO. 2019. Estimación del empleo verde en la Argentina: Sector forestal. Oficina Internacional del Trabajo. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/%40americas/%40ro-lima/%40ilo-buenos_aires/documents/publication/wcms_750425.pdf
- SESSIONS, J., ZAMORA-CRISTALES, R., MACIAS, R. J., SUSAEETA, A., & BELART, F. M. 2026. North American Forest Biomass Supply Chains for Efficient Bioenergy Production. *Energies* 19(12): 2772. <https://doi.org/10.3390/en19122772>
- VITALE, I., DONDO, R., GONZÁLEZ, M. & CÓCCOLA, M. 2022. Modelling and optimization of material flows in the wood pellet supply chain. *Applied Energy*, 313, 118776. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118776>



HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DE LA COSECHA FORESTAL. SOLUCIONES PARA EL GAP TECNOLÓGICO Y LA COMPETITIVIDAD

Patricio MAC DONAGH¹, Emanuel ALASIA², Andrés LESZCZUK³

RESUMEN

Se presentan en este trabajo algunos de los recientes avances en cosecha de madera, y se identifican los gaps de rendimiento debido a la tecnología incorporada por la maquinaria más reciente para cosecha de madera. También se mencionan las variables que afectan el rendimiento de estas máquinas, y los avances en la modelización con la incorporación de nuevas variables predictivas. En este contexto se presenta la herramienta SIMNEA para la planificación operativa de la cosecha forestal. A través de un ejemplo en cuatro lotes, se comparan por medio de esta herramienta los sistemas de fustes y los de corte a medida. Se concluye que no siempre un único sistema es el que mejor responde ante cambios de las variables silviculturales. En secuencia se señalan herramientas de planificación más complejas como la Plataforma de cosecha, el Soft Pindó, y el Tarifador forestal.

Palabras clave: *planificación operativa, productividad, costos, simulación, plantaciones*

1. INTRODUCCIÓN

La cosecha es considerada una etapa crucial en la gestión de la productividad del sistema forestal, debido a la significativa inversión de capital para la adquisición de maquinaria, a la complejidad operativa y a múltiples factores que pueden afectarla, incidiendo significativamente sobre el costo final de la madera (Mac Donagh et al., 2017; Mac Donagh et al., 2019). La productividad de la cosecha mecanizada se ve afectada por múltiples factores interrelacionados, entre los cuales se encuentran el entorno (características de los árboles, del terreno y el clima), las características de la maquinaria, así como las habilidades del operador y la gestión de la empresa que realiza la cosecha (Lindroos et al., 2017; Mac Donagh et al., 2019; Lindroos et al., 2024). Medir estas variables y predecir la productividad es un desafío debido a la complejidad de las relaciones existentes entre ellas (Gonçalves et al., 2021). En este contexto los procesos de mecanización forestal llevan a que el concepto de productividad sea cada vez más importante, y en muchos casos determinante del suceso de las operaciones forestales (Bolding et al., 2026; Khwela et al., 2026).

El aprovechamiento es la etapa final del ciclo forestal y a su vez, una de las más críticas debido a que junto con el transporte representa entre el 50 % y 60 % del costo total de producción de la madera, condicionando la rentabilidad de la inversión forestal (Mac Donagh et al. 2017; Kärhä et al., 2024). A su vez, en esta etapa se definen las dimensiones y el valor al que podrán ser comercializados los productos del bosque, con lo cual en gran medida se determina el éxito de la inversión forestal.

La cosecha de plantaciones forestales en Argentina sigue la tendencia mundial que lleva a que las máquinas sean cada vez más grandes, más tecnológicas, con mayor potencial de productividad, y a su vez con mayores precios para la compra. De esta forma, los productores, contratistas de cosecha y empresas del sector se ven involucrados en esta tendencia, y en la situación de tener que enfrentar este desafío para poder seguir produciendo, y seguir siendo competitivos (Lindroos et al., 2017; Cubbage et al., 2022; La Hera et al., 2024). En este contexto Di Fulvio et al. (2017) analizan los componentes de los costos de la maquinaria en diferentes países y observan una marcada tendencia

¹ Prof. Dr. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM; patricio.macdonagh@gmail.com

² Ing. Ftal. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM, CONICET; emanuelalasia.for@gmail.com

³ Prof. Dr. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM; leszczukandresalejandro@gmail.com



al aumento de los precios de compra de las máquinas más nuevas. Los principales fabricantes de maquinaria forestal son muy competitivos entre ellos, pero mantienen esta tendencia a lo largo del tiempo y, por ejemplo, un *harvester* de ruedas hace 20 años tenía un precio de compra del orden de los 250.000 USD, mientras que hoy en día puede superar los 600.000 USD. Lo mismo podría señalarse con máquinas relativamente más simples, como los *skidders*, con valores de adquisición del se situaban en el orden de 180.000 USD hace 20 años, a valores superiores a 450.000 USD hoy en día.

Esta tendencia se correlaciona de alguna manera con el tamaño de la máquina, la capacidad de producción, y la tecnología que van incorporando. De esta forma se pueden mencionar dos ejemplos, uno por sistema de cosecha. En el sistema *Full Tree*, las máquinas de extracción, los *skidders*, han venido aumentando de tamaño, de peso y de capacidad de producción, además de importantes mejoras ergonómicas. Un *skidder* de hace 20 años, pesaba cerca de 10 t, y podía llegar a extraer 4 a 5 metros cúbicos de fustes por viaje. Los *skidders* más modernos pesan en el orden de 20 toneladas, con una capacidad de arrastre superior a las 15 toneladas. Pero además estas máquinas ya incorporan comunicación satelital, GPS, y monitores en la cabina que permiten observar detalladamente el seguimiento de la planificación del arrastre. En el caso del sistema CTL, los *forwarders* de hace 20 años tenían un peso del orden las 10 toneladas y podían transportar unas 10 toneladas. Los *forwarders* modernos superan las 20 toneladas de peso, pueden transportar hasta 25 toneladas por viaje, pero sobre todo han incorporado mucha tecnología como GPS, monitores para los SIG de los sitios de trabajo, y automatización de movimientos del brazo de carga.

La tendencia en mecanización se dirige hacia la automatización de los procesos, y al empleo cada vez mayor de las herramientas de la denominada Inteligencia Artificial. Por ejemplo, La Hera et al. (2024), desarrollaron una plataforma equipada con los componentes de hardware esenciales para realizar tareas de extracción en forma autónoma. Mediante el uso de visión artificial, navegación autónoma y algoritmos de control de manipuladores, la máquina puede recoger troncos del suelo y maniobrar en diversos terrenos forestales sin necesidad de intervención humana. Los resultados iniciales demuestran el potencial de una extracción autónoma de troncos en forma segura y eficiente en el proceso CTL. Se logró un alto nivel de precisión con el sistema de visión artificial, y el sistema de navegación autónoma (Gráfico 1).



Gráfico 1. *Forwarder* autónomo operando en Suecia, La Hera et al. (2024)

Con lo cual se puede conjeturar que, si bien las máquinas más modernas tienen mayores valores de compra, los costos por unidad producida no deberían aumentar de la misma manera, o en el mejor de los casos podrían bajar, al tener mayor productividad. Este es entonces uno de los grandes desafíos de la mecanización de la cosecha.

2. LOS RENDIMIENTOS DE LAS MÁQUINAS FORESTALES

Los análisis clásicos de los sistemas de cosecha suelen hacerse desde la óptica de los costos, y muy frecuentemente a campo se los evalúa a través de la producción mensual, o de una manera muy preliminar por la cantidad de viajes de camión. Sin embargo, es mejor realizar el análisis desde la óptica de los rendimientos, de cada máquina en particular, y de las principales variables que afectan este



rendimiento. Esto permite establecer criterios para la toma de decisiones, y saber para cada rodal en particular cual es el mayor potencial de cada máquina en particular, o en todo caso evaluar cómo afecta el cambio de una máquina al conformar un sistema de cosecha.

La productividad de las máquinas forestales está fuertemente determinada por las características del bosque y el terreno en el que operan. La modelización de la productividad es una de las herramientas más influyentes para mejorar la planificación de las operaciones forestales (Ackerman et al. 2022; Ackerman et al. 2024; Lindroos et al. 2024).

La productividad de los equipos que realizan el corte y el trozado de los árboles (*Harvesters*, *Feller Bunchers* y Procesadores a borde de camino) está primariamente relacionada al volumen individual de los árboles aprovechados. La productividad de los *harvesters* se ha modelado ampliamente mediante regresiones lineales (Fernández-Lacruz et al., 2023; Laitila & Väättäinen, 2023; Lindroos et al., 2024), regresiones múltiples (LM) (Rosińska et al., 2022), regresiones mixtas (LMM) (Ackerman et al., 2022) y técnicas de aprendizaje automático (Liski et al., 2020). Los predictores más utilizados son el volumen del árbol (Fernández-Lacruz et al., 2023), el diámetro a la altura del pecho (DAP) (Ackerman et al., 2022, Rosińska et al. 2022), el tamaño de los troncos, el número de troncos y el volumen cosechado (Hildt et al., 2019; Kimmich et al., 2019; Liski et al., 2020; Kemmerer y Labelle, 2021). Según Lindroos et al. (2024), esta relación entre los predictores y las variables predichas puede ser lineal o no lineal. En este último caso, la magnitud del efecto depende del nivel y la distribución de la variación, así como de las propiedades de la relación no lineal.

En tanto que la productividad de los equipos que realizan la extracción de la madera (*Forwarders* y *Skidders*) está relacionada con la distancia media de extracción.

La productividad de los *forwarders* en los sistemas del tipo CTL depende de varios factores, como la pendiente (Cadei et al., 2020), la distancia de extracción (McNeel y Rutherford, 1994), el volumen de troncos (Gagliardi et al., 2020) y la densidad de los troncos (Manner y Ersson, 2023). Una planificación eficaz requiere modelos que relacionen estas variables para maximizar la productividad y reducir los costos. Los enfoques basados en datos utilizan información de campo para mejorar el proceso de toma de decisiones (Munis et al., 2022).

En el caso de los *skidders* con garra, la productividad puede variar según diversos factores, como el modelo de la máquina, la experiencia del operador, la pendiente del terreno, el diámetro y volumen promedio de los árboles, las condiciones ambientales y la distancia de arrastre. Sin embargo, los costos de producción pueden verse influenciados por el valor residual y de compra del tractor, su vida útil, las tarifas, los intereses y los impuestos, el consumo de combustible, el mantenimiento y la disponibilidad mecánica. Predecir la productividad y los costos de producción de los tractores forestales con garra es incierto debido a sus constantes variaciones, lo que podría llevar a los gestores forestales a tomar decisiones erróneas. (Simões et al., 2024)

A nivel regional, una pregunta muy frecuente se refiere a la alternativa del empleo de excavadoras modificadas con cabezal, en comparación al empleo de *harvesters* forestales de rueda. Muchas veces se descarta la posibilidad de la inversión en un *harvester* de ruedas por la diferencia de precio al comprarlo con una excavadora más cabezal, y peor aun cuando ya se tiene una excavadora actuando como cargadora, y solo se invierte en la “forestización” y en el cabezal. Sin embargo, este análisis no toma en cuenta los análisis de productividad, el potencial que tiene cada una de estas máquinas. En secuencia se presenta un análisis sobre dos máquinas trabajando en cosecha de plantaciones de *Pinus sps.* en empresas de la Provincia de Corrientes, ambas en operaciones de talas rasas. Los datos fueron provistos por las empresas, y corresponden a producción y horas de trabajo efectivo, ambos por mes. Se comparan un *harvester* de ruedas Ponsse Ergo con cabezal H7, contra una excavadora Caterpillar 320 con un cabezal Waratah 616. La base de datos contempla un año de trabajo para ambas máquinas, con lo cual quedan absorbidas las variaciones estacionales. Se ajustó una regresión polinómica de segundo grado para cada máquina, empleando el volumen individual del árbol como variable predictora, tal como se presenta en la Ecuación 1:



$$PEF = a \cdot Vi^2 + b \cdot Vi + c$$

Donde:

PEF es la productividad en metros cúbicos por hora efectiva, sin demoras.

Vi es el volumen individual del árbol, en metros cúbicos

a, b, c parámetros de la ecuación.

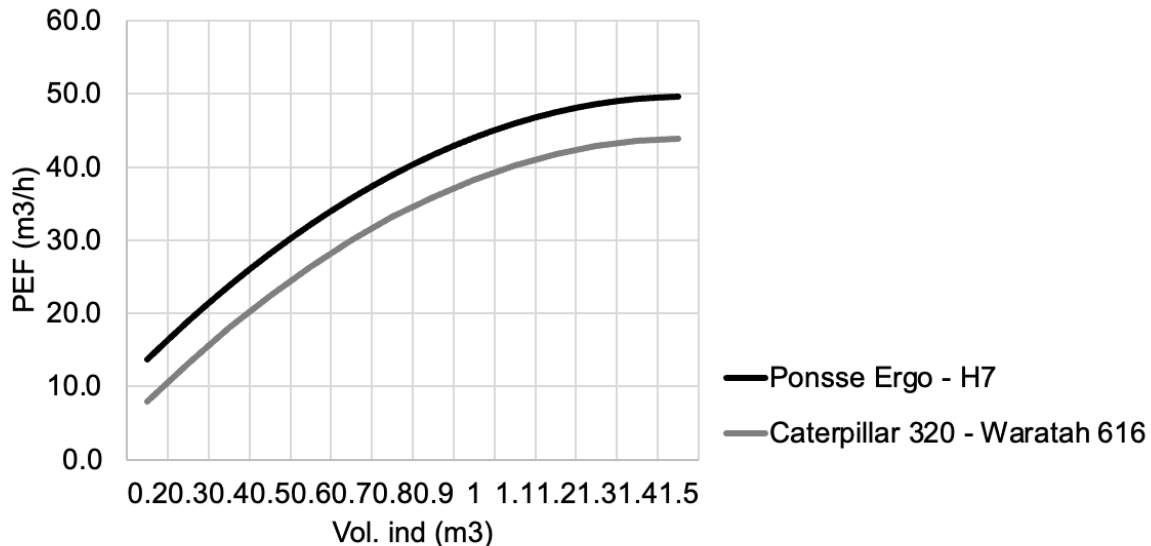


Gráfico 2. Modelos de productividad para *harvesters* de oruga y de rueda

Se observa que el *harvester* de rueda presenta un rendimiento superior a la excavadora más cabezal, para toda la gama de volúmenes considerados, entre 0,2 hasta más de 1,5 metros cúbicos por árbol. También se observa que esa diferencia es mayor en los árboles más grandes que en los más pequeños. De esta forma, surgen varias preguntas importantes, tales como:

- 1) ¿Esa diferencia en rendimiento es suficiente para justificar la inversión en un *harvester* de rueda?
- 2) Frente a una serie de lotes que debo cosechar, ¿cuál sería la máquina más conveniente para volúmenes de 0,6 m³/árbol? Ahora si el volumen medio de las plantaciones a cosechar fuera siempre superior a 1 m³/ árbol, ¿cuál sería la mejor opción?

Además, hay otro análisis muy importante que es el de la comparación de los resultados que se están obteniendo a campo, con los que se visualizan en el modelo. Esta pregunta plantea la disyuntiva frecuente de si las máquinas están trabajando al máximo de su potencial. Ya que en el caso que no sea así, muy posiblemente se deba revisar la gestión de la cosecha, la capacitación de los operarios, y las regulaciones de la máquina entre otros aspectos. En particular se puede afirmar que cuanto más tecnológica la máquina, como el caso del *harvester* de ruedas, más importantes son la gestión de la empresa y la capacitación de los operarios. Siendo que en Argentina son escasas las oportunidades de capacitar a operarios de maquinaria forestal, este punto se torna más que crítico. Por ejemplo, cuando se compara con cosechas en otros países, se observa que para máquinas similares Ackerman et al. (2022) en Sudáfrica reportan rendimientos de 60,5 m³/h para árboles de 0,92 m³. Mientras que Stadler et al. (2022) en Brasil, también en tala rasa de pinos y para un *harvester* de ruedas similar informan de productividades de 74,1 m³/h para árboles de 0,77 m³. Entonces, claramente esta operación del *harvester* Ponsse Ergo presentada en el Gráfico 2 se encuentra muy por debajo su máximo potencial. Hay un importante gap de crecimiento de productividad, que como se mencionó antes, está muy ligado a la gestión de la cosecha y a la capacitación de los operadores. Otra comparación muy frecuente a nivel regional es entre los *forwarders* de 16 t y de 19-20 t de carga. Los primeros son los *forwarders*

más comunes en nuestro sector forestal, mientras que los segundos son más frecuentes en operaciones de escala. Estas máquinas son en general más simples que los *harvesters*, tienen menos demandas de capacitación para los operarios, y suelen conocerse como máquinas muy fiables, es decir con pocas horas caídas por roturas y eficiencias superiores al 85 %. En nuestro país, y en la mayoría, estas máquinas realizan la extracción de un tipo de producto por vez, para con ello realizar pilas clasificadas en la planchada. Entonces como ya se mencionó, la principal variable que afecta el rendimiento es la distancia de extracción, y se asume que, a mayor tamaño de máquina, mayor es la distancia de extracción que optimiza el trabajo de esta. Para evaluar el efecto combinado de la distancia de extracción y del tipo de producto sobre *forwarders* de 16 y de 20 t se presenta el Gráfico 3.

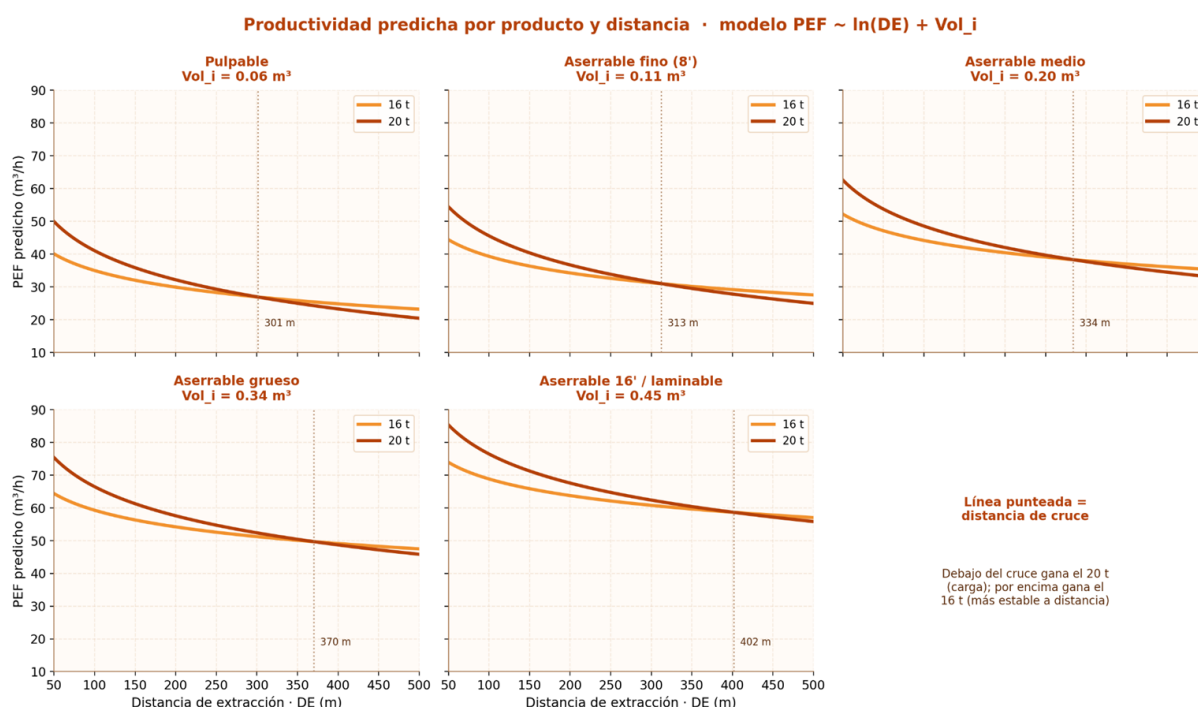


Gráfico 3. Evaluación de la productividad entre *forwarders* de 16 y 20 t, análisis de la distancia de extracción y del tipo de producto.

A diferencia de lo que se presuponía, estos gráficos están demostrando que no siempre son más productivos los *forwarders* de 19 t, y que a mayores distancias los *forwarders* más chicos pueden ser más efectivos que los más grandes. Además, también se confirma que con los productos más pequeños como los pulpables el rendimiento disminuye en ambas máquinas, mientras que los mayores rendimientos se asocian a las trozas laminables, de 0,45 m³ por unidad.

En un trabajo reciente Leszczuck et al. (2025) compararon las ventajas de los *forwarders* de 19 t respecto de los de 16 t. Los modelos ajustados para las actividades de carga, movimiento entre carga y descarga explicaron entre el 76 % y el 82 % de la variabilidad de los tiempos parciales, y alrededor del 78 % del tiempo total de ciclo. Los resultados mostraron que las actividades de carga, movimiento entre cargas y descarga concentran cerca del 70–75 % del tiempo efectivo del ciclo, y son, por lo tanto, las etapas críticas para la planificación. La productividad media efectiva fue de 47,9 m³ h⁻¹, con claras diferencias entre grupos: los *forwarders* de 19 t alcanzaron productividades promedio de 55 m³ h⁻¹, frente a 41,3 m³ h⁻¹ en los de 16 t. Más allá de la distancia de extracción, tradicionalmente considerada la variable principal, los factores que más influyeron en los tiempos fueron el volumen de carga, el volumen de trozas y la densidad o concentración de trozas en el rodal: a mayor concentración, disminuyen los tiempos de movimiento y aumentan las productividades. Los resultados indican que los *forwarders* de mayor capacidad reducen los tiempos de carga y descarga y alcanzan mayores productividades en tala rasa.



3. EL CONTEXTO ECONÓMICO, LA EVOLUCIÓN DE LOS COSTOS DE TRANSACCIÓN

Otro de los factores determinantes del resultado de la cosecha son los precios relativos, los costos de transacción, que la componen. La síntesis más clásica se reduce a tres variables principales: la cotización del dólar, el precio del combustible diesel, y los salarios. En mayor detalle se podría considerar la tasa de interés del capital invertido, el precio de los aceites y lubricantes, y los repuestos. Estos componentes están presentes en la mayoría de los sistemas de costeo y o de gestión. Sin embargo, en un análisis de las operaciones, también importa mucho la variación de estos en el tiempo, ya que, por ejemplo, en los últimos años han presentado una evolución dispar según el parámetro considerado. Para este trabajo se seleccionaron datos de una serie de tiempo entre enero 2024 y julio 2026, 31 meses. La inflación en este período fue de 234,73 %, el dólar del Banco Nación aumentó un 55 %, el precio del gasoil en USD se incrementó un 38%, y el jornal del personal de campo un 28 % (Gráfico 4A).

En el Gráfico 4B se presenta la variación de los precios de los productos forestales en Misiones, considerando rollos aserrables, pulpables, y chips, en este caso comparados con la variación del precio del gasoil. Se observa que sobre todo en los últimos meses hay un aumento del precio del combustible en USD, mientras que la mayoría de los productos forestales han bajado de precios en la misma moneda.

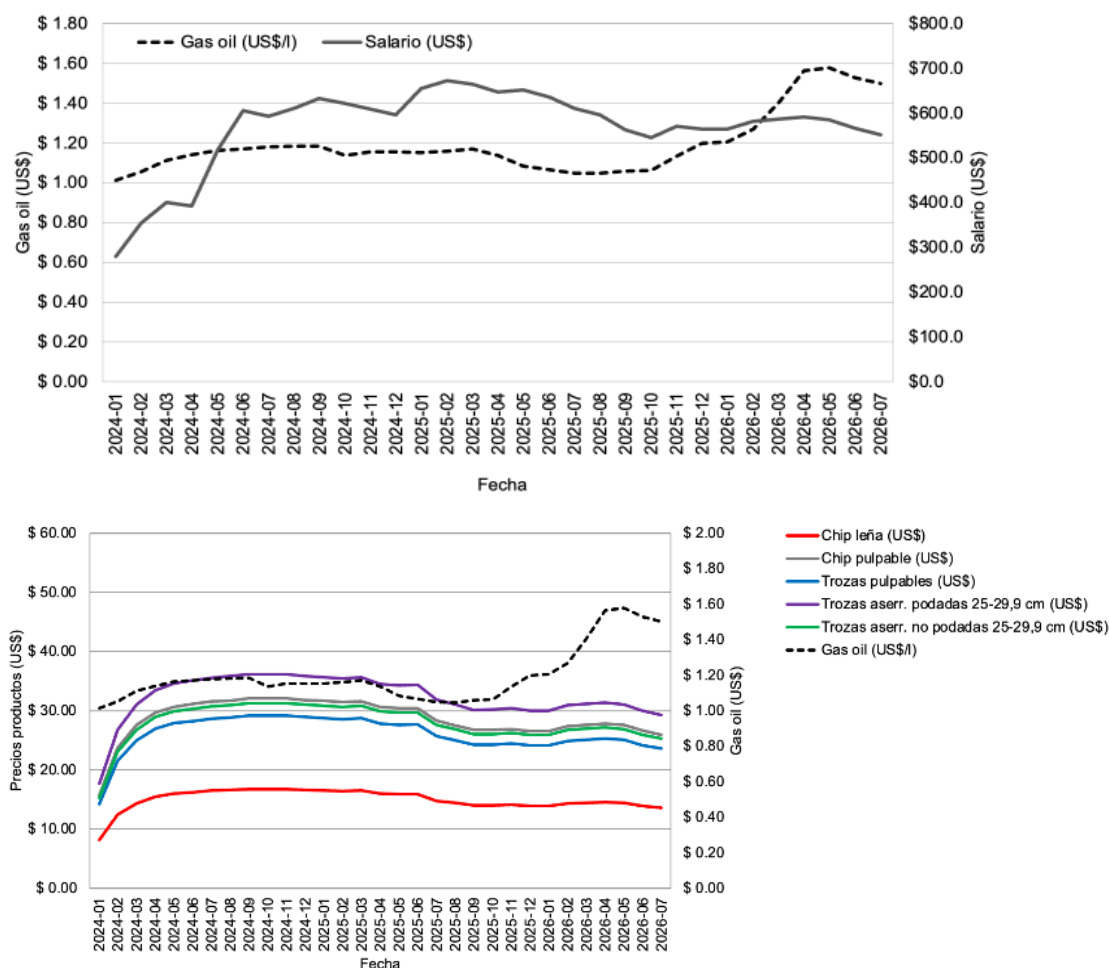


Gráfico 4. A) Variación del precio del gasoil en USD en comparación a la variación del jornal del trabajador rural en USD. B) Comparación entre los precios de los productos forestales y el valor del combustible, ambos en USD.

Queda clara a través de estas comparaciones que ha sido distinta la evolución de los precios relativos en el período considerado, con lo cual es un desafío para el productor forestal, para el tomador de



decisiones como enfrentar esta situación. Se observa en detalle que las variaciones no han sido acompañadas por los precios de los productos forestales, y que posiblemente esta situación se mantenga en el tiempo dada la sobreoferta de madera en pie, y la escasez de demanda industrial. Además, hay variables como el salario que han retrocedido, lo que en principio podría pensarse como un beneficio en el costo, y otra que han aumentado, como el precio del combustible, lo que sería entonces un perjuicio en el costo.

Como en principio la cadena de valor siempre se ajusta para atrás, los costos de cosecha deben asimilar esta situación para poder seguir produciendo, y por supuesto los márgenes de los empresarios y/o productores forestales. Queda claro que el escenario es dinámico, que las variables no tienen un comportamiento constante, en tanto que quienes producen asumen compromisos a mediano y largo plazo. Con lo cual se enfrentan a tomas de decisiones en forma frecuente, con un alto grado de riesgo, y deben por tanto contar con herramientas de gestión adecuadas para garantizar el éxito de las operaciones y la sustentabilidad de sus emprendimientos. Así, por ejemplo, tanto en un análisis de inversión en maquinaria de cosecha, como en un análisis de rentabilidad de inversiones en plantaciones forestales, es necesario emplear herramientas informáticas que contemplen esta complejidad.

4. LAS HERRAMIENTAS DE PLANIFICACIÓN DE LA COSECHA DE MADERA

La planificación de la gestión forestal se presenta a menudo en tres niveles jerárquicos: estratégico, táctico y operativo. Los objetivos estratégicos, como el rendimiento sostenido y la resiliencia climática, se planifican a cientos de años, pero el éxito en su consecución depende de las decisiones y acciones operativas cotidianas que se llevan a cabo en el bosque. Las operaciones forestales sostenibles son los pasos y procesos diarios que permiten implementar los objetivos estratégicos de gestión forestal a largo plazo. La planificación y programación operativas determinan cuándo, dónde y cómo se realizan estas operaciones. Una buena planificación operativa alinea estos procesos con los objetivos de sostenibilidad a largo plazo para garantizar que las acciones a corto plazo no comprometan dichos objetivos. Sin embargo, una mala planificación operativa puede comprometer planes estratégicos sólidos, afectando a los tres pilares de la sostenibilidad. Una planificación operativa eficaz debe tener en cuenta los componentes ecológicos y sociales de la sostenibilidad, ya que una mala planificación puede provocar degradación ambiental, pérdida de biodiversidad e impactos sociales negativos en las comunidades que dependen de estos bosques. Las consecuencias pueden incluir: reducción de los rendimientos, flujo irregular de madera, mayores costos y emisiones y daños ambientales, pérdida de la certificación y disminución de la confianza pública (Jaffray, Coupland y Paradis 2026).

El alcance y la complejidad de la planificación operativa forestal han evolucionado a la par de los avances en la tecnología de operaciones forestales y las capacidades computacionales. La transición y la adopción de prácticas mecanizadas de aprovechamiento forestal, así como la mejora de la infraestructura vial, aumentaron la capacidad operativa y la productividad, pero también ampliaron el alcance de la planificación, lo que requirió enfoques de modelización más avanzados. Estos avances, junto con los cambios en los valores sociales en torno a la gestión forestal, han incrementado la complejidad de la toma de decisiones, y la planificación operativa moderna debe ahora considerar una gama más amplia de factores ambientales, económicos y logísticos que en el pasado (Jaffray, Coupland y Paradis 2026).

Así entonces, de la misma manera que han evolucionado las máquinas, y la modelización de la productividad, se ha evolucionado en las herramientas de planificación y de gestión de esta maquinaria. Sin ir más lejos, la mayoría de los fabricantes proveen softwares propios que permiten registrar y procesar los parámetros operacionales, tanto los referidos al funcionamiento como los relacionados a la producción (Kemmerer y Labelle 2021).

La correcta planificación de las operaciones de cosecha requiere el conocimiento previo de los cambios de productividad que sufrirá cada máquina al variar las características de la forestación intervenida. Esto permite definir entre otros aspectos la duración de los turnos de trabajo de cada equipo buscando optimizar la utilización de los recursos, la combinación de máquinas, la asignación de lotes, y por ejemplo, la programación de tareas, o cronogramas operativos. El éxito de las empresas que trabajan



en cosecha en gran medida depende de su capacidad para controlar el costo de producción y planificar las actividades que conforman la cosecha.

Los contratistas forestales generalmente no utilizan Sistemas de Soporte a la Decisión (DSS) en el proceso de planificación de la cosecha, necesitando realizar ajustes constantes en el número y duración de los ciclos de trabajo, creando incertidumbre en los costos y cuellos de botella en el sistema productivo. Como referencia se puede señalar que la diferencia de costos entre una operación de cosecha previamente planificada y una no planificada podría llegar al 40 %.

Esto motiva la creación de herramientas que permitan tanto a las empresas prestadoras de servicios, empresas contratantes, y profesionales del sector, contar con información para fundamentar la toma de decisiones al momento de configurar los sistemas de cosecha que deben satisfacer las demandas de producción. Los sistemas de simulación que integran modelos de productividad de la maquinaria han demostrado ser herramientas útiles para la planificación de la producción en países con mayor experiencia forestal.

En secuencia se va a presentar un análisis por medio del software SIMNEA, para comparar la cosecha entre el sistema *Full Tree* (fuste entero) y el sistema CTL (corte a medida) para operaciones de tala rasa en plantaciones de *Pinus spp* en el NE de la Pcia. de Corrientes.

Simulaciones, SIMNEA

Para este ejercicio de simulación se emplearon cuatro lotes, en los que se emplearon como variables principales el volumen medio del árbol, la distancia de extracción, y la superficie, tal como se presenta en la Cuadro 1.

Cuadro 1. Características de los lotes de *Pinus* spp. a cosechar, con tarifa puesto arriba de camión.

Lotes	Volumen medio (m ³)	Distancia Extracción (m)	Superficie (ha)	Tarifa, cargado sobre camión (\$/t)
L21563	1	350	150	14500
L21564	1,2	250	200	12500
L14236	0,75	200	87	12000
L14237	0,6	150	120	13500

Se compararon dos sistemas de cosecha, uno representando en el sistema fuste enteros (Cuadro 2) y el otro el sistema de corte a medida (Cuadro 3)

Cuadro 2. Características de las máquinas del sistema de fustes enteros

Operación	Máquina	Vida útil (horas)	Turnos (8 horas)	Eficiencia (%)
Corte	JD 753 J	15000	1	0,8
Extracción	JD 648	15000	1	0,8
Proceso ABC	CAT320 W 616	15000	1	0,8
Proceso ABC	CAT 320 W 616	15000	1	0,8
Carga	JD 160	20000	1	0,7

Cuadro 3. Características de las máquinas del sistema de corte a medida

Operación	Máquina	Vida útil (horas)	Turnos (8 horas)	Eficiencia (%)
Corte	New Holland Valmet 370	15000	2	0,8
Extracción y carga	JD 1510	20000	2	0,8
Extracción y carga	JD 1510	20000	2	0,8

Entonces en base a estas máquinas y estos lotes, con el software SIMNEA se simularon las cosechas. De todas las variables que genera este soft al simular, se seleccionaron las principales que se presentan en el Cuadro 4.



Cuadro 4. Resultados de las simulaciones con SIMNEA

LOTE	SISTEMA	Producción (m³/mes)	Días Cosecha	Producción PE	Costo (\$/m³)	MAI
L21563	FT	17.564	85	8.313	10.420	3.038
L21564	FT	20.204	118	9.686	9.059	2.536
L14326	FT	16.205	53	11.969	16.811	-423
L14327	FT	10.887	73	10.572	16.811	-2.992
L21563	CTL	14.454	103	7.905	11.186	2.195
L21564	CTL	16.042	148	9.389	10.079	1.414
L14326	CTL	16.975	51	9.697	9.525	1.523
L14327	CTL	13.765	58	7.328	11.746	2.579

Del análisis de los resultados de las simulaciones surge que dependiendo de las condiciones del lote y de las máquinas es el sistema que más conviene. En la medida que los volúmenes sean mayores, el sistema de fustes es el que más produce, en menos tiempo, muy por arriba del punto de equilibrio y con buenos márgenes, a pesar de que en el primer lote se presenta una distancia de extracción de 350 metros, que podría considerarse no adecuada para el *skidder*. En cambio, el sistema de fustes resulta muy sensible a la disminución del volumen individual del árbol, y presenta márgenes negativos, sobre todo para vi de 0,6 m³.

El sistema de corte a medida presenta márgenes positivos entre todos los lotes. Produce menos que el sistema de fustes en volúmenes altos, pero más en los lotes con volúmenes de 0,75 y de 0,6 m³ por árbol. También presenta costos menores que el sistema FT en estos dos lotes, y como se mencionó presenta márgenes positivos.

Con lo cual se puede afirmar que no hay un único sistema de cosecha que sea la mejor opción para todos los lotes, y que, en este contexto, el proceso de simulación es el que permite dar el soporte más adecuado para estas decisiones.

Otro análisis pertinente es que en estas simulaciones se comparó un sistema como el FT que trabajó siempre a un turno, y que implicó 5 operadores para 5 máquinas. Mientras que en el sistema CTL todas las máquinas trabajaron doble turno, y totalizaron 6 operadores para tres máquinas.

La plataforma de cosecha y otras soluciones informáticas

Desde el Grupo de Trabajo en Cosecha Forestal (GTCF) de la FCF-UNaM se han generado nuevas soluciones informáticas superadoras del SIMNEA. Una de las principales limitantes del SIMNEA es que se debe simular un lote por vez, y luego la integración y análisis se realiza por fuera, en función de cada salida. Frente a la demanda de varias empresas, se desarrolló la **Plataforma de Cosecha**. Esta herramienta trabaja sobre grupos de lotes, y grupos de máquinas, y permite obtener la mejor combinación de máquinas o contratistas, para, por ejemplo, un período de seis meses. Esta solución se encuentra operativa, y el próximo paso es transformarla en formato web.

Otra solución que se ha generado desde el GTCF es el **soft Pindó**, que integra un gestor web de silvicultura en el marco de un SIG, y un SIMNEA. Este fue un proyecto ANR del FONTAR, y permite tener como base la gestión de los lotes y las tareas silviculturales, raleos y cosecha. Es una herramienta diseñada para asignar contratistas, y gestionar resultados.

Por último, otra herramienta desarrollada por el grupo es el **Tarificador de Cosecha**. Sobre la base computacional del SIMNEA, se desarrolló una herramienta para que las empresas puedan evaluar tarifas de cosecha para diferentes sistemas, diferentes conjuntos de máquinas, y variables como volumen del árbol, volumen por hectárea, distancia de extracción, y escala de la operación. Entonces, ante variaciones de los precios de los insumos, se simulan tarifas, para orientar la negociación con contratistas y clientes.

La consideración final de este trabajo es que no tiene ningún sentido incorporar maquinaria de última generación, si no se la acompaña de una adecuada planificación operativa. La planificación operativa



integra las principales variables y genera las soluciones que garantizan la obtención de los mejores rendimientos, los menores costos, y por ende la mejor integración con los objetivos de la empresa.

5. LITERATURA CITADA

- ACKERMAN, S.; TALBOT, B.; ASTRUP, R. 2022. The effect of tree and harvester size on productivity and harvester investment decisions. *International Journal of Forest Engineering* 33(1):22-32. <https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1981046>
- ACKERMAN, S.; BEKKER, J.; ASTRUP, R.; TALBOT, B. 2024. Understanding the influence of tree size distribution on the CTL harvesting productivity of two different size harvesting machines. *European Journal of Forest Research* 143(4):1199-1211. <https://doi.org/10.1007/s10342-024-01680-2>
- BOLDING, M.C.; CONRAD IV, J.L.; MAGAGNOTTI, N.; SPINELLI, R.; MILLER, T.R. 2026. Productivity and cost of cut-to-length harvesting on small wet sites in the US South. *Silva Fennica* 60(2), article id 26004. 15 p. <https://doi.org/10.14214/sf.26004>
- CADEI, A.; MOLOGNI, O.; RÖSER, D.; CAVALLI, R.; GRIGOLATO, S. 2020. Forwarder productivity in salvage logging operations in difficult terrain. *Forests* 11(3):341. <https://doi.org/10.3390/f11030341>
- CUBBAGE, F.; RUBILAR, R.; MAC DONAGH, P.; KANIESKI DA SILVA, B.; BUSSONI, A.; MORALES, V.; BALMELLI, G.; HOEFLICH, V.A.; LORD, R.; HERNÁNDEZ, C.; ZHANG, P.; HA TRAN, T.T.; YAO, R.; HALL, P.; KORHONEN, J.; DÍAZ-BALTEIRO, L.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; DAVIS, R.; CHUDY, R.; DE LA TORRE, R.; LOPERA, G.; PHIMMAVONG, S.; GARZÓN, S.; CUBAS-BAEZ, A. 2022. Comparative global timber investment costs, returns, and applications, 2020. *Journal of Forest Business Research* 1(1):90-121. <https://doi.org/10.62320/jfbr.v1i1.16>
- DI FULVIO, F.; ABBAS, D.; SPINELLI, R.; ACUNA, M.; ACKERMAN, P.; LINDROOS, O. 2017. Benchmarking technical and cost factors in forest felling and processing operations in different global regions during the period 2013-2014. *International Journal of Forest Engineering* 28(2):94-105. <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1311559>
- FERNANDEZ-LACRUZ, R.; GRÖNLUND, Ö.; JOHANNESSEN, T.; DJUPSTRÖM, L.B.; SÖDERBERG, J.; ELIASSON, L. 2023. Harvester time consumption in nature conservation management operations. *International Journal of Forest Engineering* 34(2):112-116. <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2174353>
- GAGLIARDI, K.; ACKERMAN, S.; ACKERMAN, P. 2020. Multi-product forwarder-based timber extraction: time consumption and productivity analysis of two forwarder models over multiple products and extraction distances. *Croatian Journal of Forest Engineering* 41(2):231-242. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.736>
- GONÇALVES, S.B.; FIEDLER, N.C.; SILVA, J.P.M.; et al. 2021. Machine learning techniques to estimate mechanised forest cutting productivity. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 83(4):276-283. <https://doi.org/10.2989/20702620.2021.1994342>
- HILDT, E.; LESZCZUK, A.; SCHLICHTER, T.; MAC DONAGH, P. 2019. Efecto de la densidad de las forestaciones y la intensidad de cosecha en raleos mecanizados con harvester. *Scientia Forestalis* 47(123). <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n123.06>
- JAFFRAY, R.; COUPLAND, K.; PARADIS, G. 2026. Forest harvesting operational planning tools: a systematic review of optimization, simulation, and spatial decision support systems. *International Journal of Forest Engineering*. <https://doi.org/10.1080/14942119.2026.2662184>
- KÄRHÄ, K.; SEURI, M.; MAC DONAGH, P.; ACUNA, M.; KANZIAN, C.; PETKOVIĆ, V.; OLIVERA, A. 2024. Overview of global long-distance road transportation of industrial roundwood. *Croatian Journal of Forest Engineering* 45(1):217-236. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2286>
- KEMMERER, J.; LABELLE, E.R. 2021. Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research* 140(1):1-17. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01313-4>
- KHWELA, N.; RAMANTSWANA, M.; SPINELLI, R.; MAGAGNOTTI, N. 2026. Comparing manual and automated time and tree volume data for estimating harvester productivity in a Pinus taeda stand. *International Journal of Forest Engineering*. <https://doi.org/10.1080/14942119.2026.2702759>
- KIMMICH, D.; HILDT, E.; MAC DONAGH, P.M. 2019. Recuperación de valor con harvester aplicando tecnología de optimización de trozado. *Scientia Forestalis* 47(122):216-223. <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n122.04>



- LA HERA, P.; MENDOZA-TREJO, O.; LINDROOS, O.; LIDESKOG, H.; LINDBÄCK, T.; LATIF, S.; LI, S.; KARLBERG, M. 2024. Exploring the feasibility of autonomous forestry operations: results from the first experimental unmanned machine. *Journal of Field Robotics* 41(4):942-965. <https://doi.org/10.1002/rob.22300>
- LAITILA, J., & VÄÄTÄINEN, K. (2023). The productivity and cost of harvesting whole trees from early thinnings with a felling head designed for continuous cutting and accumulation. *International Journal of Forest Engineering*, 34(1), 76-89. <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2094192>
- LESZCZUK, A.; CARDOSO, O.; HILDT, E.; MAC DONAGH, P. 2025. A field model to analyze the improvements of the 19 t forwarders against the 16 t. In: *Proceedings of the 57th International Symposium on Forest Mechanization (FORMEC)*. www.formec.org
- LINDROOS, O.; LA HERA, P.; HÄGGSTRÖM, C. 2017. Drivers of advances in mechanized timber harvesting: a selective review of technological innovation. *Croatian Journal of Forest Engineering* 38(2):243-258. <https://hrcak.srce.hr/190922>
- LINDROOS, O.; PETTERSSON, J.; NORDFJELL, T. 2024. How stem size variations in forest stands influence harvester productivity and the use of productivity models. *International Journal of Forest Engineering* 35(3):389-398. <https://doi.org/10.1080/14942119.2024.2387523>
- LISKI, E.; JOUNELA, P.; KORPUNEN, H.; SOSA, A.; LINDROOS, O.; JYLHÄ, P. 2020. Modeling the productivity of mechanized CTL harvesting with statistical machine learning methods. *International Journal of Forest Engineering* 31(3):253-262. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1820750>
- MAC DONAGH, P.; BOTTA, G.; SCHLICHTER, T.; CUBBAGE, F. 2017. Harvesting contractor production and costs in forest plantations of Argentina, Brazil, and Uruguay. *International Journal of Forest Engineering* 28(3):157-168. <https://doi.org/10.1080/14942119.2017.1360657>
- MAC DONAGH, P.; VELAZCO, S.J.E.; BOTTA, G.F.; SCHLICHTER, T.; CUBBAGE, F. 2019. Logging contractors' growth in the Southern Cone: an analysis of contractor business strategies, innovation, and mechanization. *Forests* 10(1):69. <https://doi.org/10.3390/f10010069>
- MANNER, J.; ERSSON, B.T. 2023. A pilot study of continuous cover forestry in boreal forests: do remaining trees affect forwarder productivity? *Journal of Forest Science* 69(7):317-323. <https://doi.org/10.17221/44/2023-JFS>
- MCNEEL, J.F.; RUTHERFORD, D. 1994. Modelling harvester-forwarder system performance in a selection harvest. *Journal of Forest Engineering* 6(1):7-14. <https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702661>
- MUNIS, R.A.; ALMEIDA, R.O.; CAMARGO, D.A.; DA SILVA, R.B.G.; WOJCIECHOWSKI, J.; SIMÕES, D. 2022. Machine learning methods to estimate productivity of harvesters: mechanized timber harvesting in Brazil. *Forests* 13(7):1068. <https://doi.org/10.3390/f13071068>
- ROSIŃSKA, M.; BEMBENEK, M.; PICCHIO, R.; KARASZEWSKI, Z.; ĐUKA, A.; MEDERSKI, P.S. 2022. Determining harvester productivity curves of thinning operations in birch stands of Central Europe. *Croatian Journal of Forest Engineering* 43(1):1-12. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2022.1691>
- SIMÕES, D.; DA SILVA, R.B.G.; MIYAJIMA, R.H.; AVELINO, L.T.; BARREIROS, R.M. 2024. Impact of skidding and slope on grapple skidder productivity and costs: a Monte Carlo simulation in Eucalyptus plantations. *Forests* 15(11):1890. <https://doi.org/10.3390/f15111890>
- STADLER, J.A.; LOPES, E.S.; RODRIGUES, C.K.; DE OLIVEIRA, F.M.; DINIZ, C.C.C. 2022. Harvester productivity and costs in clear cutting *Pinus taeda* stands under different management regimes. *Floresta* 52(1):189-196. <https://doi.org/10.5380/rf.v52i1.80310>



¿POR QUÉ CORRIENTES ESTÁ RECIBIENDO INVERSIONES INDUSTRIALES LIGADAS A LA FORESTACIÓN?

Luis María MESTRES¹

Corrientes tiene 88.199 km² (casi 8.2 millones de hectáreas) históricamente fue una provincia dedicada a la ganadería con algo de agricultura. Cabe destacar que la Ley Nacional 13.273/1948 “**Riqueza Forestal**” si bien estaba más orientada a los bosques nativos también incluía un fomento a las plantaciones con créditos a tasas subsidiadas, desgravación del impuesto a las ganancias, exención al impuesto inmobiliario, etc.

A partir de las décadas de 1960/70 surgen otras políticas públicas nacionales de fomento a las plantaciones forestales como:

Ley 20.628/1973 que permitió la desgravación del impuesto a las ganancias del crecimiento de la masa forestal.

Ley 21.695/1977 llamada de **crédito fiscal**, aunque en realidad era un subsidio, la Resolución 778/1992 de la Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (SAGyP) que crea el Régimen de Promoción de Plantaciones Forestales (RPPF).

Ley 25.080/1999 **Inversiones para Bosques Cultivados** que otorga subsidios y beneficios fiscales para proyectos forestales durante 10 años. Luego fue prorrogada por mismo período por la Ley 26.432/2009 y la 27.487/2019 vigente hasta el año 2029.

Los objetivos perseguidos de estos distintos regímenes de promoción son:

Sustitución de importaciones ya que históricamente la balanza comercial del sector fue siempre deficitaria entre 500 a 800 millones de dólares.

Generar empleo tanto en el sector primario e industrial. Hoy el sector foresto industrial genera más de 100.000 puestos de trabajo

Desarrollar la Industria Forestal a partir de asegurar la materia prima (plantaciones) que se logran con estos instrumentos de promoción

Aumento de las exportaciones para generar superávit de la balanza comercial incorporando divisas para el desarrollo del país.

En este contexto la Provincia de Corrientes fue haciéndose forestal, logrando hoy en día más de 500.000 hectáreas forestadas (5.6 % de la superficie total provincial) aproximadamente con un 70 % del género Pinus y 30 % del género Eucalyptus a un ritmo de plantación de aproximadamente 25.000 hectáreas por año. Ello la lleva a ser la primera provincia forestal en cuanto a superficie plantada y eso se debe a sus condiciones naturales de clima, suelo, recursos humanos capacitados, investigación tanto pública como privada, organización pública y privada, productores e inversores que han decidido apostar al sector, aunque sea de largo plazo y con poca seguridad jurídica. Se ha creado el Plan

Estratégico Foresto Industrial de Corrientes (PEFIC 2013) de una manera participativa entre el sector público (gobierno provincial, universidad) y privado para luego constituir la Asociación del PEFIC (APEFIC) para el monitoreo y seguimiento de este. Hay que destacar el acompañamiento del gobierno provincial al sector foresto industrial proveyendo herramientas de financiamiento y legislación adecuada al sector.

Se hace muy necesario aclarar las características únicas que tiene el sector forestal respecto a otras producciones primarias como agricultura y ganadería referido a los tiempos de siembra y cosecha. En el caso forestal desde el vivero a la cosecha final se pueden necesitar entre 10 a 15 años como mínimo

¹ Ing. Ftal. – Secretario de Desarrollo Foresto Industrial – Corrientes.



dependiendo del Género y Especie de que se trate y del destino de la producción (energía, tableros de partículas o compensados, celulosa, aserrado, bonos de carbono, biorefinerías, etc). En definitiva, los tiempos son mucho más largos, la planificación a mediano y largo plazo es más que necesaria. Los errores del presente se notan a los 10-15 años.

Esta consideración es muy importante tenerla en cuenta para las políticas públicas de acompañamiento al sector y la decisión de los inversores para apostar al sector tanto primario como industrial.

En este contexto Corrientes en la última década ha estado recibiendo inversiones de tipo industrial por alrededor de 500 millones de dólares y anuncios de nuevas inversiones por más de 2.300 millones de dólares que incluye el anuncio de la instalación de una planta de celulosa (ARPULP) por 2.000 millones de dólares.

De allí la pregunta ¿por qué Corrientes recibe inversiones de este tipo?

Atraer inversiones de proyectos industriales en el sector requiere tener **disponibilidad de materia prima** para abastecer los mismos, cosa que la provincia tiene. Así mismo ofrecer al potencial inversor la **seguridad jurídica** necesaria para este tipo de proyectos que, necesariamente son de mediano a largo plazo, es fundamental. En ese sentido el gobierno provincial ha definido como **estratégico al sector foresto industrial** y ha acompañado y acompaña al mismo en todo lo que sean resortes provinciales. No siempre la provincia fue acompañada por el gobierno nacional, el conflicto con la ex Botnia, hoy UPM, nos afectó mucho ya que era factible recibir una inversión de ese tipo y por esta situación automáticamente fue descartado. Pese a todo lo que se dijo de los graves “problemas” que generaría esa industria, hoy (septiembre 2026) la planta de UPM cumple 19 años de funcionamiento, la evidencia está la vista.

CONSTITUCIÓN PROVINCIAL – REFORMA 2007

DISPOSICIONES TRANSITORIAS

Primera. *Pacto Correntino para el Crecimiento Económico y el Desarrollo Social.* Bases para la formulación de políticas de Estado.

4 EJES:

DESARROLLO / MODERNIZACIÓN/ INCLUSIÓN / GÉNERO

El “*Pacto Correntino para el Crecimiento Económico y el Desarrollo Social*” es la formulación institucional de las coincidencias alcanzadas para la elaboración de **políticas de Estado**, con el propósito de sostenerlas en el tiempo como denominador común para obtener el **crecimiento económico, erradicar la pobreza y lograr la inclusión social**, en consonancia con los ODS - objetivos de desarrollo sustentables del milenio, establecidos por la Organización de las Naciones Unidas y adaptados a la realidad provincial.

En el Eje de Desarrollo se destaca el sector de la industria forestal al proponer **Promover como ejes prioritarios de las políticas de Estado**, el impulso de la industria agroalimentaria y **forestal**, el turismo, de la agregación de valor en cada sector de la cadena productiva, en forma amigable con el medio ambiente, y el fomento de la actividad cooperativa y mutualista.

Como gobierno provincial hemos promovido distintas herramientas de planificación como:

- Inventario Bosques Cultivados y Nativos (Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos – OTBN), Censo de Industrias Forestales, Estadísticas de plantaciones, permisos de quema, exportaciones, etc
- **PEFIC 2013** (Plan Estratégico Foresto Industrial de Corrientes) – APEFIC (Asociación del PEFIC)

4 Líneas Estratégicas CONSENSUADAS con los Municipios, el sector privado, Comunidad Científica, INTA, INTI, ONGs.

1. **Desarrollo de la Ind. Ftal.:** CRÉDITOS – CTFIV (Centro Tecnológico Foresto Industrial de Virasoro) – Laboratorio de calidad madera en la EEA del INTA de Bella Vista.



2. Adecuación de la Infraestructura para la Producción: CAMINOS 1.800 viajes por día los 365 días si se industrializa todo en la provincia, PUERTOS (Ituzaingó, Corrientes, Lavalle), ELECTRIFICACIÓN, 18 Parques Industriales.

3. Desarrollo Forestal de Calidad: SILVICULTURA, CONSORCIOS FTALES, INTA, INTI, Educación Técnica y Universitaria,

4. Estrategia Ambiente + Producción: FSC – CERFOAR (más del 50 % de la superficie forestada bajo estándares internacionales de certificación de sustentabilidad ambiental). Educación Ambiental por Ley Provincial 6514.

• **Consejo Prov. Manejo del Fuego** (Ley Provincial 5.590 de Manejo del Fuego), EDUCACIÓN Técnica y Universitaria,

• **LEGISLACIÓN FDR** (Fondo de Desarrollo Rural que recauda el impuesto Inmobiliario Rural que luego de descontar coparticipación a Municipios (19 %) se destina exclusivamente a infraestructura rural (camino, electrificación, luchas sanitarias), FIDECOR (Fondo de Inversión para el desarrollo de Corrientes), FODIN (Fondo de Desarrollo Industrial), IFE (Instituto de Fomentos Empresarial), etc.

PRESENTE Y FUTURO

1. Atracción de nuevas INVERSIONES

2. Infraestructura adecuada a las necesidades del sector

3. Sector Foresto Industrial 1º sector en EXPORTACIONES en Corrientes

4. Tierras disponibles para incrementar la superficie cultivada (1 a 2 millones has)

5. Aumento del uso de la madera: Construcción, Biorefinerías, Generación de Energía, Celulosa, packaging, Bonos de C, etc

CONCLUSIÓN

Cuando se define una Política Pública consensuada y se mantiene a lo largo del tiempo, comienzan a verse los resultados de los objetivos propuestos.

En el gobierno provincial tenemos como función, generar las mejores condiciones para que quién decide invertir en Corrientes encuentre el clima de negocio adecuado para ello para su emprendimiento.

Hoy Corrientes en el término de 10 años ha recibido inversiones, solo Foresto Industriales, por más de 500 millones de dólares, hay algunas en ejecución y otras proyectadas por más de 2.300 millones



RESÚMENES EXTENDIDOS



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD PRODUCTIVA COMO INSUMO PARA LA SELECCIÓN EN PROGRAMAS DE MEJORAMIENTO GENÉTICO FORESTAL

Sebastián BONNIN¹, Laura FAUSTINO¹, Ezequiel FERNÁNDEZ TSCHIEDER¹, Javier ALVAREZ¹

RESUMEN

Las plantaciones forestales deben adaptarse a las variaciones climáticas que ocurren durante el ciclo productivo y a la heterogeneidad ambiental entre sitios. En este contexto, los Programas de Mejoramiento Genético Forestal (PMGF) buscan desarrollar genotipos con alta productividad y capacidad de adaptación a distintos ambientes. La estabilidad productiva – capacidad de mantener la productividad en los diferentes ambientes – constituye una variable de interés para complementar los criterios de selección basados únicamente en el crecimiento. El objetivo de este trabajo fue incorporar los análisis de estabilidad productiva como una herramienta útil para la selección de genotipos en PMGF. Para ello, se analizó una red de ensayos de parcelas mono-árbol con 16 clones de *Populus deltoides* establecidos en cinco sitios del Bajo Delta del Paraná. El crecimiento se caracterizó mediante el diámetro del fuste a la altura del pecho (DAP) a los 10 años, mientras que la estabilidad productiva se estimó utilizando el índice de plasticidad fenotípica RDPIs. Los resultados mostraron diferencias entre clones tanto en crecimiento como en estabilidad productiva. El análisis conjunto de productividad y estabilidad permitió identificar genotipos con desempeños contrastantes en relación con la estabilidad productiva que no hubieran sido fácilmente detectados a partir del ranking de crecimiento. La estabilidad productiva aportó información complementaria para fortalecer los procesos de selección y recomendación de genotipos en un contexto de cambio climático y heterogeneidad ambiental.

Palabras clave: *Populus deltoides*, selección, estabilidad productiva, variabilidad ambiental.

1. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales deben adaptarse no solo a los cambios temporales en el ambiente producto de los largos plazos entre la plantación y la cosecha, sino también a la heterogeneidad ambiental entre sitios. Esto plantea una serie de desafíos que se ven acrecentados en un contexto de cambio climático: es altamente probable que una plantación forestal se vea sometida a diversos estreses ambientales a lo largo del ciclo productivo (Rubilar et al., 2024). En este contexto, cobra relevancia identificar genotipos capaces de mantener un desempeño productivo consistente frente a ambientes contrastantes. En general, los Programas de Mejoramiento Genético Forestal (PMGF) tienen como objetivo el desarrollo de genotipos mejorados para usos de alto valor y de gran adaptabilidad (Cortizo y Monteverde, 2017). Además de características relacionadas con la sanidad, forma y calidad de la madera, una de las principales aptitudes que se tiene en cuenta para la selección de estos genotipos es su desempeño productivo (Nunes et al., 2018). El crecimiento es una información de gran relevancia para la selección, aunque no es el único dato relacionado a la productividad que debe tenerse en cuenta. Para hacer más robustos los criterios de selección se puede analizar la estabilidad productiva. Este concepto hace referencia a la capacidad de un genotipo de mantener un crecimiento homogéneo entre diferentes ambientes (sitios) (Alvarez et al., 2020). Un genotipo que tenga un rendimiento similar entre distintos sitios será considerado estable, mientras que otro que rinda de forma sustancialmente diferente entre ambientes será considerado inestable. Dicha estabilidad puede valorarse positivamente cuando un genotipo es capaz de sostener un alto rendimiento en distintos sitios, pero la misma estabilidad puede ser menos relevante si el rendimiento es bajo. Por otro lado, la inestabilidad productiva no es negativa *per se* dado que puede asociarse a genotipos con alta capacidad de

¹ INTA EEA Delta del Paraná. bonnin.sebastian@inta.gob.ar



respuesta frente a mejoras en las condiciones de crecimiento y mayor rendimiento en sitios de alta calidad. En una evaluación basada en un ranking de rendimiento medio, este tipo de genotipos podría no destacarse del resto especialmente en aquellos casos con mal desempeño en condiciones de baja calidad de sitio. Por lo tanto, el análisis de la estabilidad productiva es un complemento del análisis del crecimiento y deben ser considerados en forma conjunta. El presente trabajo tiene como objetivo incorporar los análisis de estabilidad productiva como una herramienta útil para la selección de genotipos en Programas de Mejoramiento Genético Forestal. Para mostrar la utilidad del análisis conjunto de productividad y estabilidad, se caracterizaron 12 clones experimentales y 4 clones comerciales de *Populus deltoides* del PMGF de INTA Delta del Paraná en 5 sitios del Bajo Delta del Paraná.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El PMGF de INTA Delta del Paraná cuenta con una red de ensayos para la evaluación a campo de diversos genotipos. Los ensayos de la red evaluada en este trabajo fueron instalados en 5 sitios en parcelas mono-árbol, con 5 a 7 bloques (repeticiones) en cada sitio, en campos de productores del Bajo Delta del Paraná a partir del 2013. En la misma se evaluaron genotipos obtenidos por el cruzamiento controlado entre *P. deltoides* 'Nandi INTA' × *P. deltoides* 'Sacha 109'. En estos ensayos se compararon más de 25 genotipos, empleando como testigos los clones comerciales *P. deltoides* 'Australiano 129/60', *P. deltoides* 'Carabelas INTA', *P. deltoides* 'Hovyú INTA' y *P. deltoides* 'Pytá INTA' (en adelante A129, Carabelas, Hovyú y Pytá, respectivamente). En etapas previas del PMGF se seleccionaron 12 clones experimentales como potenciales candidatos a ser inscriptos en el Registro Nacional de Cultivares. Para los siguientes análisis se empleó la información de esos 12 clones experimentales y de los 4 testigos que completan la red.

Crecimiento

Se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) a los 10 años en los 5 ensayos mono-árbol de la red. A partir de estos datos se ajustó un modelo lineal mixto (Bates et al., 2015), considerando al clon como efecto fijo, y al ensayo y bloque dentro de ensayo como efectos aleatorios. La significancia del efecto clon se evaluó mediante análisis de varianza del modelo mixto. Posteriormente, se estimaron las medias marginales ajustadas (Estimated Marginal Means, EMM) para cada clon, las cuales fueron utilizadas para construir el ranking de crecimiento. Las comparaciones múltiples entre medias ajustadas se realizaron mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Estabilidad productiva

Para estimar la estabilidad productiva de cada clon se utilizó el índice de plasticidad fenotípica RDPIs (Relative Distance Plasticity Index simplified) (Valladares et al., 2006). El RDPIs asigna un valor entre 0 y 1 a la variable de interés. En este caso, los valores más bajos indican que los genotipos tuvieron un crecimiento en DAP similar entre sitios (estabilidad), mientras que valores más altos señalan una mayor variabilidad en crecimiento entre sitios (inestabilidad). Se obtuvo un valor de RDPIs para cada clon según lo descripto por Alvarez et al. (2020).

Análisis conjunto crecimiento-estabilidad

Se realizó un gráfico de dispersión para analizar de forma integrada el crecimiento en DAP y la estabilidad productiva (RDPIs). El gráfico es dividido de forma vertical según el crecimiento medio de los 16 clones evaluados, y de forma horizontal según la estabilidad media (expresada mediante el índice RDPIs). De este modo, se pueden identificar clones de mayor crecimiento (derecha) y menor crecimiento (izquierda) que el crecimiento medio de la red; y clones de mayor estabilidad (abajo) y menor estabilidad (arriba) que la estabilidad media de la red.

Software empleado

Todos los análisis fueron realizados en R v4.6.0 (R Core Team, 2025). Para los análisis estadísticos se utilizaron los paquetes lme4, lmerTest, emmeans y multcompView (Bates et al., 2015; Kuznetsova et



al., 2017; Graves et al., 2023; Lenth, 2025). Para la construcción de las figuras se empleó el paquete ggplot2. Se trabajó a través del entorno RStudio versión 2026.05.1.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Gráfico 1 se presenta el ranking de clones ordenados de menor a mayor DAP a los 10 años. El rango de DAP observado se ubicó entre los 22 cm y los 34 cm. En primer lugar, se identifica que el clon con menor crecimiento en DAP fue el testigo A129. Esto resulta relevante ya que se trata de uno de los clones más plantados en la región. En el otro extremo se encuentran los clones experimentales 26-28, 3-19, 17-2 y 19-18, aunque no presentan diferencias significativas respecto de los testigos Hovyú y Pytá. Resulta importante destacar que estos dos clones testigo son genotipos mejorados que ya fueron evaluados en redes anteriores e inscriptos como comerciales por su aptitud productiva. Tener como referencia su crecimiento es una forma de poner una línea de base de productividad elevada para contrastar a los clones experimentales en evaluación. Por otra parte, se observó que en 10 de los 12 clones experimentales el DAP fue significativamente mayor que el de los testigos A129 y Carabelas. Sin embargo, cabe destacar que se trata de ensayos de parcelas mono-árbol y esto puede tener implicancias en el desempeño de los individuos. Según Nunes et al. (2018) el diseño de parcelas mono-árbol puede llevar a una sobreestimación de los mejores genotipos y una subestimación de los peores del ranking dada la asimetría de la competencia que propicia este diseño. Otro aspecto relevante a tener en cuenta es que, a medida que los PMGF avanzan y las nuevas generaciones son comparadas con materiales previamente mejorados, la magnitud de las ganancias adicionales de rendimiento tienden a reducirse (Li et al., 2025). En este contexto, variables complementarias como la estabilidad productiva pueden aportar información valiosa para discriminar genotipos con desempeños similares en crecimiento y que permitan ajustar la selección de genotipos para cada ambiente.

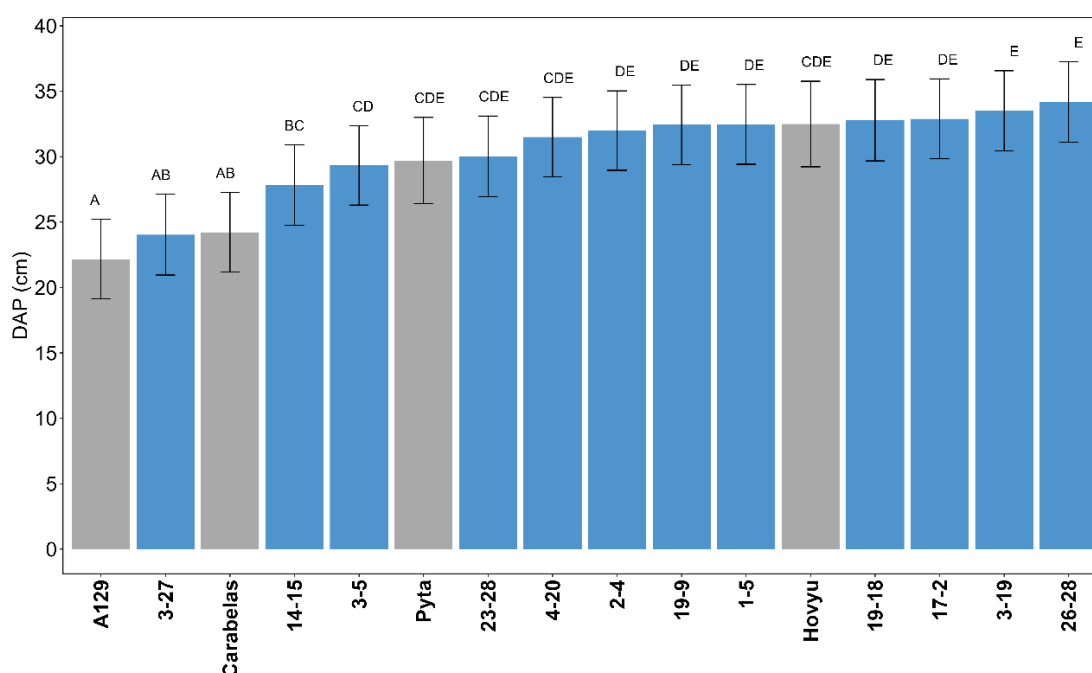


Gráfico 1. Ranking de clones de *Populus deltoides* según DAP (cm) a los 10 años. Las barras representan las medias marginales estimadas (EMM) mediante un modelo lineal mixto. Las barras de error indican intervalos de confianza del 95 %. Los clones experimentales se muestran en celeste y los testigos en gris. Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

En el Gráfico 2 se puede observar el resultado del análisis conjunto de la estabilidad productiva y el crecimiento en DAP de los 12 clones experimentales y los 4 testigos analizados. En primer lugar, se observó una gran dispersión entre clones: se identificaron genotipos en los 4 cuadrantes de la figura. Al observar el eje vertical, se identificó un marcado gradiente de estabilidad productiva entre el clon



experimental 23-28 (más estable) y el testigo Pytá (más inestable). Si bien los valores de RDPIs obtenidos ocuparon una pequeña porción del rango teórico del índice (0–1), las diferencias observadas permitieron discriminar respuestas contrastantes frente a un mismo gradiente ambiental. Esto resulta particularmente relevante considerando que los clones experimentales provienen de un único cruzamiento controlado. En este contexto, el interés del RDPIs radica en su capacidad para identificar diferencias relativas de estabilidad entre genotipos emparentados. Respecto del crecimiento, se observó que la mayoría de los clones experimentales tuvieron un DAP igual o mayor a la media general, ocupando las posiciones del centro hacia la derecha. Esta información es equiparable a la que se podría obtener del ranking de la Figura 1. Sin embargo, al tratarse de un análisis conjunto con la estabilidad productiva, se pueden identificar patrones de comportamiento disímiles entre genotipos de similar crecimiento promedio entre sitios. Hay 8 genotipos experimentales que difieren en su capacidad de sostener el rendimiento entre sitios, a pesar de tratarse de clones sin diferencias estadísticamente significativas en tamaño. Estos genotipos tuvieron un crecimiento medio similar, pero se evidenció una respuesta diferencial a los cambios en el ambiente. Por ejemplo, se observó un contraste claro en la estabilidad productiva entre los clones 1-5 y 2-4, o entre 23-28 y Pytá. Otro de los aspectos sobresalientes de este análisis es la posibilidad de identificar vacantes en la oferta de clones comerciales disponibles. Por ejemplo, en este caso no se observaron clones testigos en el cuadrante inferior derecho (crecimiento y estabilidad por encima de la media general). Cubrir estas vacantes puede ser un criterio de selección que se suma a los ya mencionados y determine la inclusión de algunos clones experimentales en las etapas finales del PMGF.

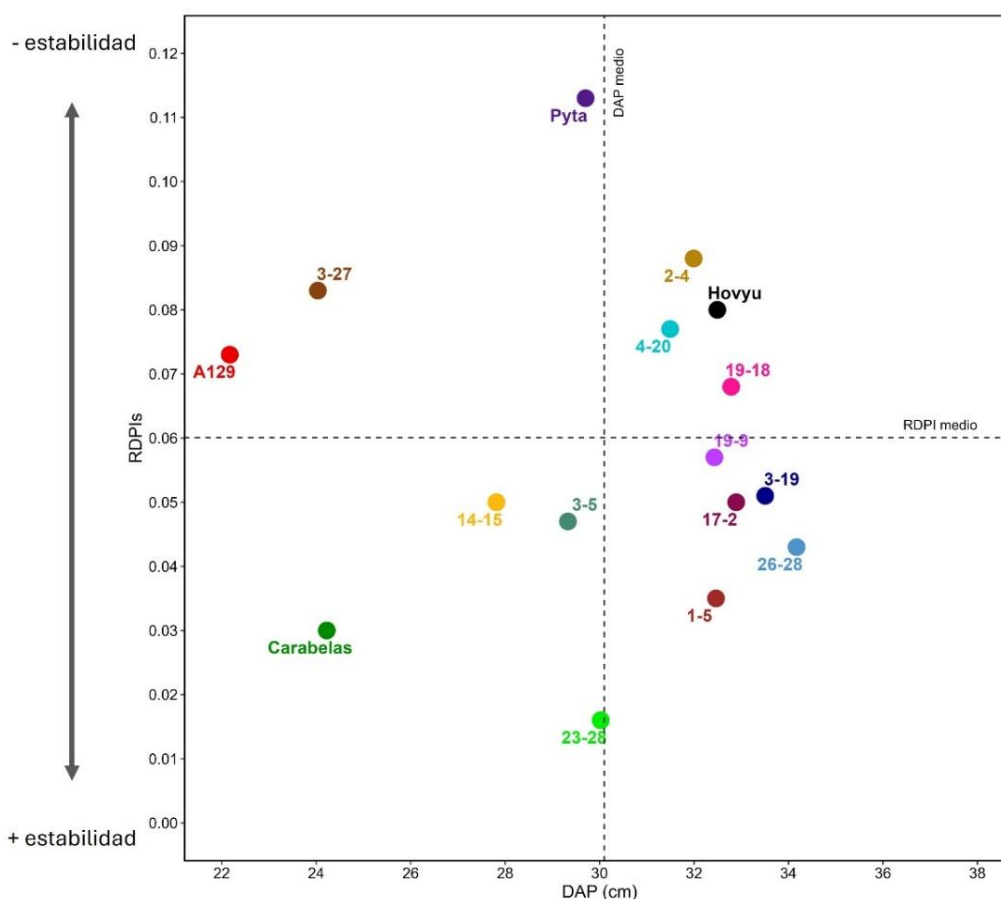


Gráfico 2. Análisis conjunto del crecimiento y la estabilidad productiva de 16 clones de *P. deltoides* a los 10 años. El eje horizontal representa el DAP medio (cm) de cada clon entre los 5 sitios de la red. El eje vertical representa la estabilidad productiva media (RDPIs) de cada clon entre los 5 sitios de la red. La línea vertical punteada representa el DAP medio entre los 16 genotipos evaluados. La línea horizontal punteada representa la estabilidad media (RDPIs medio) entre los 16 genotipos evaluados.



4. CONCLUSIONES

La información adicional aportada por el análisis conjunto crecimiento-estabilidad sería difícil de detectar con un análisis basado exclusivamente en el ranking de crecimiento. Por este motivo se propone el análisis de la estabilidad productiva como complemento para identificar comportamientos que permitan adecuar la selección de genotipos en los PMGF. Contar con este tipo de información permitiría adecuar la oferta de genotipos y las recomendaciones silviculturales asociadas. A partir de estos análisis sería posible, por ejemplo, destacar la estabilidad de genotipos altamente productivos y recomendarlos para sitios de menor calidad, ya que podrían sostener su crecimiento en ambientes limitantes. Por otra parte, podrían recomendarse los genotipos con mayor respuesta a los cambios en el ambiente para los mejores sitios, ya que podrían expresar allí todo su potencial productivo. Finalmente, en un contexto de creciente variabilidad ambiental y climática, la incorporación de criterios complementarios al crecimiento podría contribuir al desarrollo de una oferta de genotipos más diversa y mejor adaptada a las distintas condiciones productivas. En este sentido, la estabilidad productiva constituye una herramienta adicional para fortalecer los procesos de selección y recomendación de genotipos dentro de los PMGF.

5. LITERATURA CITADA

- ALVAREZ, J.A.; CORTIZO, S.C.; GYENGÉ, J.E. 2020. Yield stability and phenotypic plasticity of *Populus* spp. Clones growing in environmental gradients: I-yield stability under field conditions. *Forest Ecology and Management* 463(117995): 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117995>
- BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- CORTIZO, S.C.; MONTEVERDE, S. 2017. Seis nuevos clones de álamo, recientemente incorporados al Registro Nacional de Cultivares de Argentina, mejoran la oferta clonal de la cadena foresto-industrial de las Salicáceas. 1-9. http://jornadasdesalicaceas2017.blogspot.com/p/trabajos-tecnicos_21.html
- GRAVES, S.; PIEPHO, H.P.; SELZER, L.; DORAI-RAJ, S. 2023. multcompView: Visualizations of Paired Comparisons. R package version 0.1-10. <https://CRAN.R-project.org/package=multcompView>
- KUZNETSOVA, A.; BROCKHOFF, P.B.; CHRISTENSEN, R.H.B. 2017. lmerTest Package: Tests in Linear Mixed Effects Models. *Journal of Statistical Software* 82(13): 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>
- LENTH, R.V. 2025. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. R package version 1.11.x. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>
- LI, C.; LI, B.; ZHAO, W.; JIANG, J.; TANG, J. 2025. Forest tree breeding under the global environmental change: Challenges and opportunities. *Trees, Forests and People*, 20, 100867. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100867>
- NUNES, A.C.P.; DOS SANTOS, O.P.; DOS SANTOS, G.A.; DE RESENDE, M.D.V. 2018. Statistical strategies design based on competition classes of *Eucalyptus* clones. *Industrial Crops and Products* 124: 66-73. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.07.026>
- R CORE TEAM. 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing [Software]. R Foundation for Statistical Computing Disponible en: <https://www.R-project.org/>
- RUBILAR, R. A.; VALVERDE, J. C.; BARRIENTOS, G.; CAMPOE, O.C. 2024. Water and Temperature Ecophysiological Challenges of Forests Plantations under Climate Change. *Forests* 15(4): 654. <https://doi.org/10.3390/f15040654>
- VALLADARES, F.; SANCHEZ-GOMEZ, D.; ZAVALA, M.A. 2006. Quantitative estimation of phenotypic plasticity: Bridging the gap between the evolutionary concept and its ecological applications. *Journal of Ecology* 94(6): 1103-1116. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2006.01176.x>



DESARROLLO DEL PRIMER HUERTO SEMILLERO DE *Corymbia torelliana* PARA CORTINAS ROMPEVIENTOS EN ARGENTINA

Augusto J. LÓPEZ¹, Carlos D. VERA BRAVO²

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados de la evaluación de un ensayo de progenies de *Corymbia torelliana* y de la estrategia de selección utilizada para conformar un huerto semillero orientado a cortinas rompevientos. Los valores genéticos individuales para altura se estimaron mediante REML/BLUP y se integraron con criterios de selección basados en la arquitectura de copa y la representación de las distintas progenies. La estrategia permitió capturar una ganancia genética esperada del 7,2 % en altura, manteniendo la diversidad del material. El 50 % superior de los individuos del huerto alcanzó una ganancia genética aproximada del 11,7 %. El huerto semillero constituye una base para la producción de semilla mejorada destinada a cortinas rompevientos y sienta un antecedente para el desarrollo de estrategias orientadas a sistemas de protección en la Argentina.

Palabras clave: *mejoramiento genético forestal, huerto semillero, sistemas de protección, Corymbia torelliana.*

1. INTRODUCCIÓN

Las cortinas forestales o rompevientos son utilizadas como una herramienta de manejo para reducir la velocidad del viento, mitigar sus efectos adversos y modificar el microclima en las áreas protegidas (Tassara et al., 2008; Thomas y Rodríguez, 2014; Oberschelp et al., 2020). Su implementación como práctica estructural favorece la protección de cultivos agrícolas, sistemas ganaderos y otras producciones agroforestales, contribuyendo a la sostenibilidad y productividad de estos sistemas (Enescu et al., 2025).

En el noreste de Argentina, las casuarinas han sido una de las principales especies utilizadas para la conformación de cortinas rompevientos (Oberschelp et al., 2020). Sin embargo, el avance del decaimiento y la mortandad de las casuarinas asociado a escarabajos ambrosia ha puesto en cuestionamiento su uso, promoviendo la búsqueda de especies alternativas (Ramos, 2017).

En ese sentido, *Corymbia torelliana* ha mostrado buena aptitud en cortinas rompevientos, con buenos crecimientos iniciales y adaptación a condiciones subtropicales (Reis et al., 2014; Rockwood et al., 2022). Ensayos de progenies del Programa de Mejoramiento Genético Forestal del INTA confirman su buena adaptación local y destacan una mayor tolerancia al frío que otras especies de *Corymbia* (Giménez et al., 2022; 2025). Si bien presenta crecimientos inferiores a los de otras especies de *Corymbia* y *Eucalyptus* utilizadas con fines forestales (Lee, 2007; Rockwood et al., 2022; Giménez et al., 2022; 2025), la amplitud de su copa y la persistencia de sus ramas (Lee, 2007; Rockwood et al., 2026) la convierten en una alternativa promisorio para sistemas de protección, como bosques de reparo y cortinas rompevientos.

Sin embargo, las estrategias de mejoramiento genético forestal desarrolladas en el noreste de Argentina se han enfocado principalmente en la producción de madera sólida de alto valor (aserrado, postes, entre otros fines industriales), sin considerar en detalle atributos clave para cortinas rompevientos, como la estructura de copa y la persistencia de las ramas. En este contexto, se presentan los resultados de la evaluación de un ensayo de progenies de *C. torelliana*, a partir del cual se realizó

¹ Grupo Forestal EEA INTA Bella Vista, e-mail: lopez.javier@inta.gob.ar.

² Ex- Grupo Forestal EEA INTA Bella Vista.



un raleo genético que permitió conformar un huerto semillero orientado a cortinas rompevientos, constituyendo un antecedente en la Argentina para el desarrollo de estrategias orientadas a sistemas de protección.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

a. Material genético, sitio de estudio y evaluaciones de ensayos

El trabajo se desarrolló a partir de un ensayo de progenies de polinización libre de *Corymbia torelliana*, establecido en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) INTA Bella Vista, Corrientes, Argentina, sobre un suelo arenoso (28°27'6.80" S; 58°59'40.91" O). El diseño experimental correspondió al de bloques de tratamientos aleatorizados, con parcelas de un solo árbol y 18 repeticiones. La distancia de plantación fue de 3,5 m × 3,5 m.

Se evaluaron 40 progenies de medio hermanos pertenecientes a la base genética del programa de mejoramiento de *Corymbia* del INTA (Cuadro 1). A los 3,7 años se evaluó la altura total (m) de cada individuo, utilizada para la estimación de los valores genéticos.

Cuadro 1. Origen y procedencia de las progenies evaluadas.

Fuente	N° de familias	Origen/Procedencia
SeedEnergy	24	Helenvale, 25 km South of Cooktown (QLD, Australia). Lote 1095. (15°42' S, 145°13' E).
INTA	13	Ex-IFONA, Goya, Corrientes, Argentina (29°16' S, 59°13' O). Individuos seleccionados en parcelas experimentales plantadas en 1958 con material salvaje de origen desconocido.
INTA	3	INTA, Bella Vista Corrientes, Argentina (28°26' S, 58°59' O). Individuos seleccionados en cortinas rompevientos.

b. Análisis genético

La información fue analizada mediante modelos lineales mixtos, estimándose valores genéticos familiares (a nivel de progenies) e individuales para la altura total con el software SELEGEN REML/BLUP (Resende, 2014). El modelo correspondió a $y = Xr + Za + e$, donde y es el vector de las observaciones, r es el vector de los efectos de repeticiones (asumidos como fijos) sumados a la media general, a es el vector de efectos genéticos aditivos individuales (asumidos como aleatorios) y e es el vector de los residuos (asumidos como aleatorios). X y Z corresponden a las respectivas matrices de incidencia. El efecto de procedencia no fue contemplado dado el reducido número y distribución desbalanceadas de estas.

c. Estrategia de selección

Para la selección de los individuos destinados a conformar el huerto, se integró la información genética con criterios operativos y funcionales, procurando un equilibrio entre ganancia genética, diversidad y funcionalidad del huerto. Para ello, la selección se realizó en etapas: *i)* se elaboró un ranking familiar, agrupando las progenies en tres estratos según su desempeño en altura (superior, intermedio e inferior), *ii)* con base en los valores genéticos individuales, se seleccionaron 8, 5 y 3 individuos por progenie en cada estrato, respectivamente, priorizando el desempeño individual, *iii)* a partir de esta selección se realizó el raleo principal del ensayo y *iv)* sobre el conjunto remanente, se realizó un ajuste final mediante evaluación visual de la arquitectura de copa, eliminando individuos con copas estrechas y escasa ramificación. En esta etapa se descartó un 14 % adicional de los árboles seleccionados.

El conjunto remanente conformó el huerto semillero de progenies (HSP). Los resultados presentados a continuación sustentan la estrategia de selección utilizada para su conformación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las alturas observadas oscilaron entre 3,6 y 11,4 m (media 7,7 m) valores comparables a los reportados en la bibliografía para crecimientos iniciales en *C. torelliana* (Giménez et al., 2022; 2025; Rockwood et



al., 2022), evidenciando una variabilidad aprovechable para la selección y la conformación del huerto semillero.

La estructura del material evaluado y la ganancia genética estimada para la altura en los distintos grupos se presentan en el Cuadro 2. Se observa un gradiente en la ganancia genética media de los estratos, con valores positivos en el estrato superior (5,97 %) y negativos en el inferior (-6,34 %).

La ganancia genética esperada para el conjunto total de individuos retenidos en el huerto semillero (HSP) fue de 7,2 %, resultado de una composición que combinó individuos de los distintos estratos y progenies, manteniendo un balance entre ganancia genética y diversidad. El huerto final quedó conformado por 92, 56 y 32 individuos de los estratos superior, medio e inferior, respectivamente (Gráfico 1). Esta composición difirió levemente del esquema inicial de selección (8–5–3) debido a la remoción adicional de individuos (~14 %) en función de la evaluación de la arquitectura de copa en campo.

Tabla 2. Estructura del huerto semillero (HSP) y ganancia genética estimada por estrato y grupo.

Grupo / Estrato	N° de familias	N° de individuos	Ganancia genética (%)*
Superior	13	166	5,97
Medio	14	170	0,33
Inferior	13	155	-6,34
HSP	40	180	7,20

*Ganancia genética expresada en porcentaje respecto a la media poblacional.

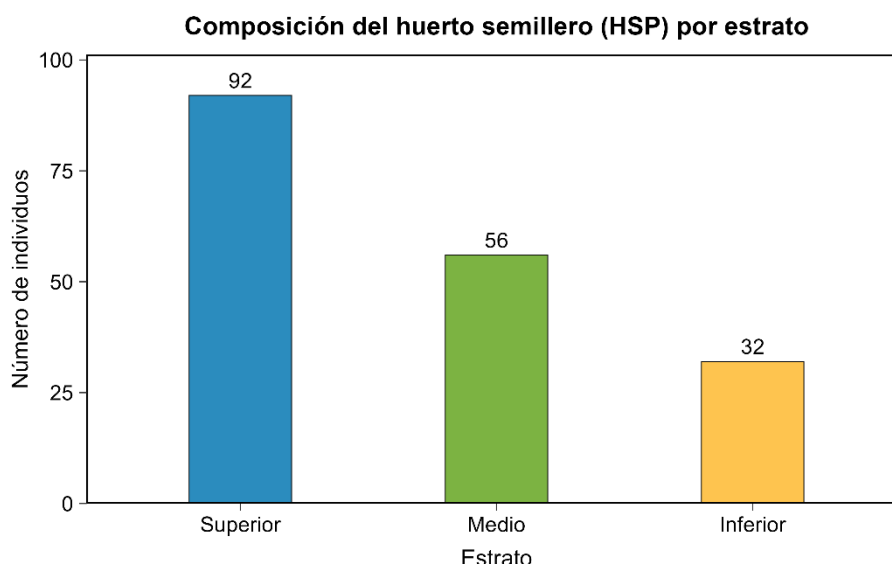


Gráfico 1. Distribución de individuos por estrato de desempeño en altura en el huerto semillero de progenies (HSP)

Por otra parte, y con el objetivo de describir la composición de la fracción del huerto en la que se concentra la mayor parte de la ganancia genética, se analizó el 50 % superior del ranking individual. Este subconjunto permite caracterizar los individuos que integran el grupo de mayor mérito genético, sin implicar un esquema de selección o manejo reproductivo diferencial.

En el Gráfico 2 se presenta la distribución de los valores genéticos individuales por estrato en el huerto semillero y dentro del 50 % superior del ranking. En este último grupo predominan los individuos del estrato superior, aunque también se observa la presencia de individuos provenientes de progenies de los estratos medio e inferior. En términos de composición, este subconjunto incluye 64, 20 y 6 individuos de los estratos superior, medio e inferior, respectivamente, y alcanza una ganancia genética esperada de aproximadamente 11,7 %.

A su vez, el 30,4 % de los individuos pertenecientes a progenies del estrato superior no forman parte de este grupo. En conjunto, estos resultados evidencian la variabilidad individual presente dentro de

los estratos y refuerzan el criterio de selección adoptado, que permite capturar ganancia genética manteniendo una adecuada diversidad del material.

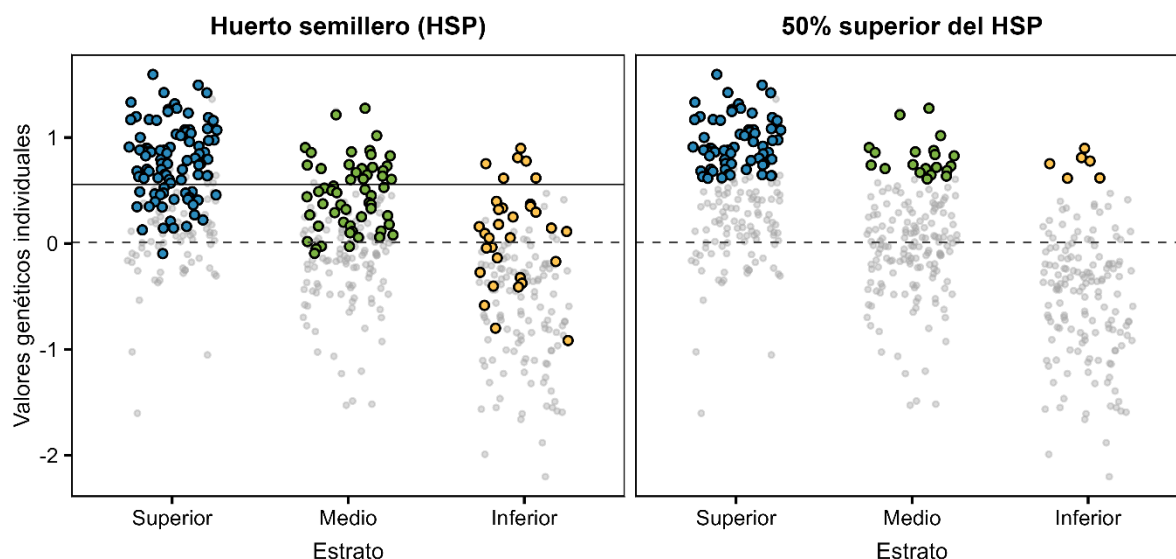


Gráfico 2. Distribución de los valores genéticos individuales por estrato de desempeño en altura en el huerto semillero (HSP) (*izquierda*) y en el 50 % superior del ranking individual del HSP (*derecha*). Las líneas horizontales indican la media poblacional (punteada) y la media del HSP (sólida).

Como complemento a los resultados obtenidos, la Figura 1 presenta cortinas rompevientos implantadas en establecimientos productivos de la región utilizando una mezcla de semillas remanentes de la instalación del ensayo de progenies. Si bien este material no representa la configuración final del HSP, permite ilustrar el comportamiento general del material en condiciones operativas.

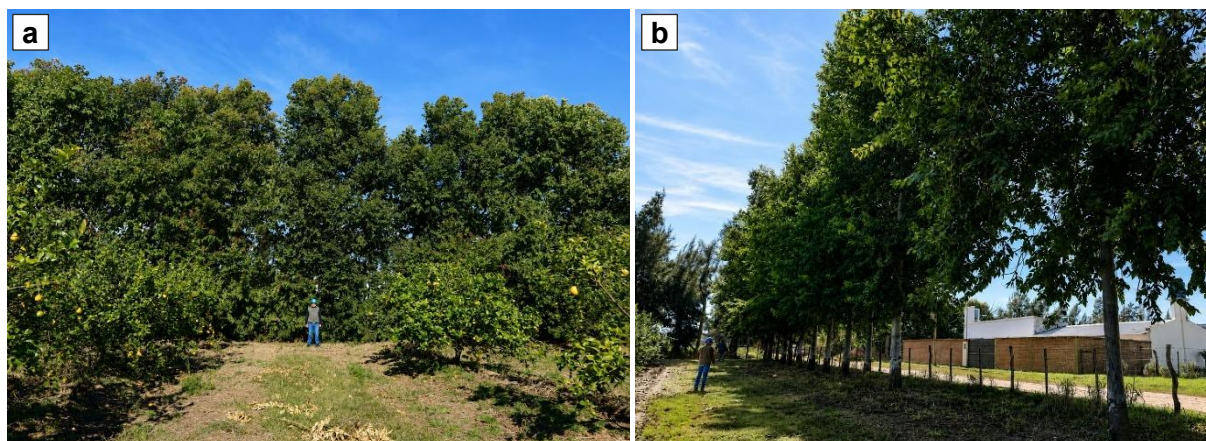


Figura 1. Cortinas forestales de *C. torelliana* establecidas en sistemas productivos del departamento de Bella Vista. **a)** Cortina rompevientos en un monte cítrico. Edad: 7,5 años. Altura: 13,7 m. **b)** Cortina ubicada junto al casco del establecimiento, con poda baja asociada a su ubicación. Edad: 7,5 años. Altura: 11,7 m.

4. CONCLUSIONES

Los resultados evidenciaron una variabilidad genética aprovechable en el material evaluado de *Corymbia torelliana*. La estrategia aplicada para la conformación del huerto semillero permitió capturar ganancia genética manteniendo la diversidad del material. Su estructura final constituye una base para la producción de semilla mejorada destinada a cortinas rompevientos. Asimismo, representa una alternativa para ampliar el aprovechamiento del material genético disponible en programas de mejoramiento y sienta un antecedente para el desarrollo de estrategias orientadas a sistemas de protección en la Argentina.



5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los auxiliares Adrián Aranda, Juan Sánchez y Cristian Almirón del Grupo Forestal de la EEA INTA Bella Vista, por su colaboración en las tareas de campo. Asimismo, expresan un especial agradecimiento al Ing. Juan A. López por sus valiosos aportes al desarrollo del programa de mejoramiento genético de *Corymbia* del INTA y por las sugerencias que contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

6. LITERATURA CITADA

- ENESCU, C. M.; MIHALACHE, M.; ILIE, L.; DINCA, L.; CONSTANDACHE, C.; MURARIU, G. 2025. Agricultural Benefits of Shelterbelts and Windbreaks: A Bibliometric Analysis. *Agriculture* 15:1204. <https://doi.org/10.3390/agriculture15111204>
- GIMENEZ, C. A.; HARRAND, L.; LÓPEZ, J. A.; MARTÍNEZ-MEIER, A. 2022. Daño por heladas y crecimiento de *Corymbia* spp. al segundo año de edad en Concordia, Entre Ríos, Argentina. IX Reunión del Grupo de Genética y Mejoramiento Forestal del INTA (GeMFo), Sáenz Peña, Chaco. 20 al 22 de septiembre de 2022. ISBN: 978-987-88-6537-9.
- GIMENEZ, C. A.; LÓPEZ, J. A.; VERA BRAVO, C. D.; HARRAND, L.; MARTÍNEZ-MEIER, A. 2025. Quantitative genetic variation in growth, cold tolerance and wood density of *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* and *Corymbia torelliana* in Argentina. *New Forests* 56:44. <https://doi.org/10.1007/s11056-025-10112-x>
- LEE, D. J. 2007. Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand 2: Development of *Corymbia* species and hybrids for plantations in eastern Australia. *Australian Forestry* 70(1): 11–16.
- OBERSCHHELP, G. P. J.; HARRAND, L.; MASTRANDREA, C. A.; SALTO, C. S.; PALENZONA, M. F. 2020. Cortinas forestales: rompevientos y amortiguadoras de deriva de agroquímicos. Ediciones INTA. Estación Experimental Agropecuaria Concordia. 13 p. ISBN 978-987-8333-42-7.
- RAMOS, S. 2017. Distribución y progresión del decaimiento y muerte de casuarinas en el noreste de Entre Ríos. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos. 4 p. Disponible en: https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2017/Ramos_Distribucion-y-progresion-DMC.pdf
- REIS C. A. F.; ASSIS T. F.; SANTOS A. M.; FILHO E. P. 2014. *Corymbia torelliana*: estado da arte de pesquisas no Brasil. 1ª edición, versión electrónica. Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 1980-3958; 261.
- RESENDE, M. D. V. DE. 2014. SELEGEN-REML/BLUP: Sistema Estatístico e Seleção Genética Computadorizada. Versão junho de 2014. Embrapa-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Copyright: INPI Nº 00052763.
- TASSARA, M. A.; THOMAS, E. R.; RODRÍGUEZ, A. B. 2008. Barreras rompevientos. *Revista Fruticultura y Diversificación* 57: 33-37.
- THOMAS, E. R.; RODRÍGUEZ, A. B. 2014. Barreras rompevientos con álamos y sauces. INTA. ISBN: 978-987-521-537-5.
- ROCKWOOD, D. L.; HUBER, D. A.; CRAWFORD, M. A.; RUCKS, P. C.; LAMB, E.; FABBRO, K. W.; MINOGUE, P. J.; JUMP, R.; HODGE, G. R. 2022. *Eucalyptus amplifolia* and *Corymbia torelliana* in the Southeastern USA: Genetic Improvement and Potential Uses. *Forests* 2022, 13(1), 75. <https://doi.org/10.3390/f13010075>
- ROCKWOOD, D. L.; TAMANG, B.; RUCKS, P.; ELLIS, M. F.; LAMB, E.; WINANDY, J. E.; GRIBBINS, N. R. 2026. Cadaghi (*Corymbia torelliana*). In: McNulty, Steven, project lead. The Silvics of North America. U.S. Department of Agriculture, Forest Service; Natural Resources Canada, Canadian Forest Service; National Forestry Commission of Mexico, collaborators. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. <https://doi.org/10.2737/sna.corymbia.torelliana>.



NUEVOS SAUCES MEJORADOS: UNA OFERTA TECNOLÓGICA INNOVATIVA PARA LA FORESTO-INDUSTRIA Y OTRAS APLICACIONES

Teresa CERRILLO¹

RESUMEN

Entre 2013 y 2026 el INTA incrementó en forma significativa la oferta tecnológica de sauces (*Salix* spp), con base metodológica en la ampliación de la diversidad genética y selección fenotípica. La red de ensayos de campo en el delta del Paraná mostró la superioridad de germoplasma resultante de cruzamientos de *Salix matsudana*, *Salix alba*, *Salix nigra* y *Salix amygdaloides*, respecto a clones tradicionales, considerando integralmente crecimiento, forma del árbol y tecnología de la madera. De un total de diecisiete individuos seleccionados hasta el momento, catorce poseen estándar “doble propósito plus” (aptitud para aserrado y calidad superior para la industria papelera), constituyendo una innovación tecnológica, que también muestra buen potencial en otras regiones del país. A la par de estos desarrollos para la foresto-industria, se desarrollaron a través de adaptaciones metodológicas realizadas al programa original, ocho cultivares de la especie nativa *Salix humboldtiana*, comúnmente llamado “sauce criollo”, y cinco cultivares de sauce-mimbre, con origen en las especies introducidas *Salix viminalis* y *Salix caprea*. Se resumen aquí las principales características de estos grupos de sauces, como aporte de una nueva oferta tecnológica innovativa para aplicaciones productivas y ambientales, y con potencial para proyectos en diferentes escalas y regiones del país.

Palabras clave: *Salix*, mejoramiento genético, cultivares, usos múltiples

1. INTRODUCCIÓN

Los sauces (*Salix* spp) comprenden árboles y arbustos con origen casi exclusivo en el hemisferio norte, existiendo en Sudamérica una sola especie autóctona, *Salix humboldtiana* (“sauce criollo”). Se los caracteriza por su fácil propagación, rápido crecimiento y adaptación a sitios con limitantes, como excesos hídricos o con niveles altos de salinidad. En Argentina, las plantaciones se localizan preponderantemente en el delta del Río Paraná; existiendo superficies plantadas en otras regiones, como Cuyo y Patagonia, donde frecuentemente se usan para el establecimiento de cortinas rompevientos (Thomas y Ponce, 2025). El mayor volumen de madera de sauce es consumido por las industrias del papel (para diarios y para embalaje) y de tableros de partículas, y en menor medida, en aserrado (Borodowski, 2022). Asimismo, son recursos útiles para otras aplicaciones, entre las que se destacan la fitorremediación (Romagnoli et al, 2022), la recuperación de ecosistemas y la integración en sistemas silvopastoriles (Casaubón et al, 2018). La amplia diversidad de sauces comprende también a los de tipo arbustivo (“mimbres”), usados para cestería y fabricación de muebles livianos; conformando una cadena productiva localizada principalmente en el Delta, cuya rentabilidad puede ser mejorada con el uso de genética adecuada, manejo y aplicación de diseño (Álvarez, 2008).

Esta multiplicidad de aplicaciones del sauce ha motivado la ampliación de los alcances del programa original de Mejoramiento Genético de Sauces de INTA y ha fundamentado la adaptación de metodologías para el logro de una oferta tecnológica más completa, atendiendo a las necesidades de las demandas más relevantes, sumando así al “sauce criollo” y el mimbre. Sobre las características más importantes de esta producción técnica trata el presente trabajo.

¹ AER Delta Frontal, EEA Delta del Paraná, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Las Casuarinas 50, Tigre, cerrillo.teresa@inta.gob.ar



2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sauces para la foresto-industria y usos ambientales

La nueva oferta tecnológica comprende diecisiete cultivares desarrollados a través de un programa de mejoramiento clásico, sobre una población de mejora conformado por germoplasma de las especies *Salix matsudana* Koidt, *Salix alba* L, *Salix nigra* Marshall y *Salix amygdaloides* Andersson. Las sucesivas etapas de evaluación tomaron como criterios de selección: crecimiento, adaptación, forma del árbol, sanidad y aptitud tecnológica de la madera. Todos los materiales se encuentran inscriptos en el Registro Nacional de Cultivares del INASE (Cerrillo et al, 2013; Cerrillo et al, 2025a).

Sauce nativo, para usos ambientales

Teniendo como objetivos centrales la conservación de *Salix humboldtiana* Willd. (sauce criollo) y su incorporación al programa de mejora genética, desde 2009 se desarrolló una línea de trabajo focalizada en germoplasma con origen en el delta bonaerense y entrerriano, donde la especie constituye un componente fundamental del ecosistema. Mediante un trabajo de domesticación y selección, apoyado en análisis morfométricos complementados con estudios moleculares, se seleccionaron ocho individuos provenientes de capturas de material vegetativo realizadas en San Pedro y Campana (Buenos Aires), y en Victoria y Diamante (Entre Ríos). Todos se encuentran inscriptos en el Registro Nacional de Cultivares del INASE (Cerrillo et al, 2025b).

Sauce- mimbre, para cestería y muebles livianos.

A partir de una población de mejora lograda por cruzamientos controlados de *Salix viminalis* L. y *Salix caprea* L. se efectuaron evaluaciones en experimentos de campo que tomaron en consideración: crecimiento, número de tallos principales, supervivencia, forma y flexibilidad de las ramas; tolerancia a plagas y enfermedades y capacidad de rebrote después del corte. Cinco cultivares fueron seleccionados y registrados en el INASE para el fortalecimiento de esta cadena (Cerrillo, 2022).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sauces para la foresto-industria y usos ambientales

Como muestra el Gráfico 1, quince de los diecisiete cultivares selectos (que se muestran en color) en distintas etapas superan significativamente en crecimiento, expresado en Incremento Medio Anual (IMA), al promedio de los testigos tradicionales (en negro). Esta condición posibilita acortar el ciclo de aprovechamiento hasta la mitad respecto del clon tradicional *Salix babylonica* var *sacramenta* 'Soveny Americano' ("SA"), de óptima calidad industria papelera, pero de mal performance forestal.

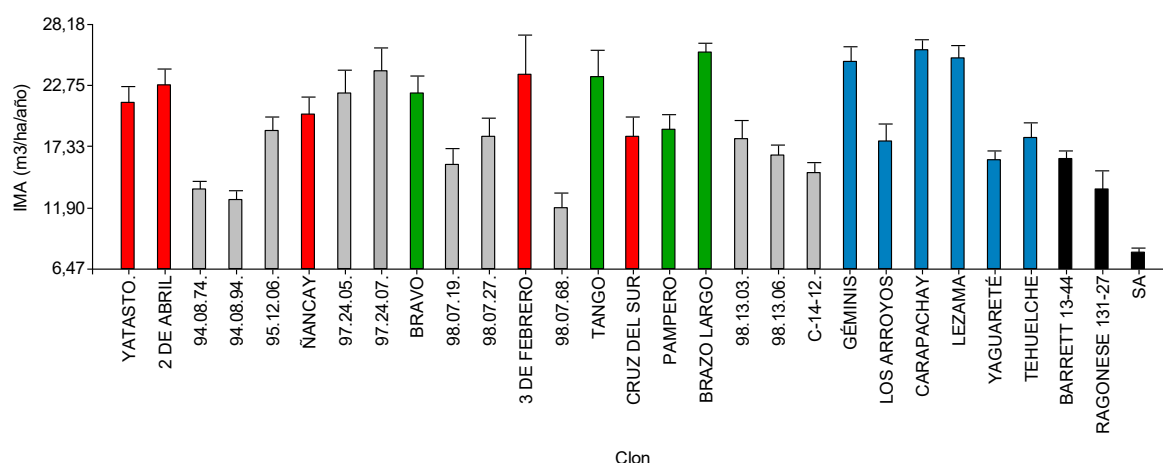


Gráfico 1. Incremento medio anual de volumen (IMA) en m³. ha⁻¹. año⁻¹ de los cultivares inscriptos: en 2026 (en rojo), en 2025 (en verde), entre 2013 y 2022 (en azul) y los sauces tradicionales como control (en negro). En gris: individuos experimentales.



Del total de diecisiete nuevos cultivares, catorce comparten con el clon de referencia “SA” aptitud tecnológica superior para la industria papelera, característica evaluada en laboratorio y validada en el proceso industrial (Grande, 2025). Sumando a ello la mejor forma y mayor tasa de crecimiento y aptitud para aserrado, el grupo se caracteriza como de “doble propósito plus”, consolidando una oferta innovadora orientada tanto a la productividad como a la aptitud tecnológica integral (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características generales y aptitud de la madera de los cultivares

Nombre del cultivar	Cruzamiento	Año del cruzam.	Año de registro	Sexo	Aptitud de uso	
					A	DP
LOS ARROYOS INTA CIEF	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1994	2013	M	✓	✓
AGRONALES INTA CIEF	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1995	2013	M	✓	X
LEZAMA INTA CIEF	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix nigra</i>	1998	2013	F	✓	✓
GÉMINIS INTA CIEF	<i>Salix matsudana</i> (p.a.)	1990	2013	F	✓	✓
YAGUARETÉ INTA CIEF	<i>Salix alba</i> (p.a.)	1994	2013	M	✓	✓
IBICUY INTA CIEF	<i>Salix nigra</i> (p.a.)	1989	2013	M	✓	X
CARAPACHAY INTA CIEF	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1998	2017	M	✓	✓
TEHUELCHÉ INTA	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1994	2022	M	✓	✓
BRAVO INTA	<i>Salix matsudana</i> (p.a.)	1998	2025	M	✓	✓
TANGO INTA	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1998	2025	F	✓	✓
BRAZO LARGO INTA	<i>Salix nigra</i> (p.a.)	1998	2025	F	✓	X
PAMPERO INTA	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1998	2025	F	✓	✓
YATASTO INTA	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1994	2026	M	✓	✓
2 DE ABRIL INTA	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1994	2026	M	✓	✓
3 DE FEBRERO INTA	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1998	2026	M	✓	✓
CRUZ DEL SUR INTA	<i>Salix matsudana</i> x <i>Salix alba</i>	1998	2026	H	✓	✓
ÑANCAY INTA	<i>Salix amygdaloides</i> (p.a.)	1997	2026	F	✓	✓

(p.a.): polinización abierta M: masculino - F: femenino - H: hermafrodita A: aserrado -

DP: doble propósito “plus”: con estándar equivalente a “Soveny Americano” (el sauce más destacado para la industria del papel para diarios y para embalaje y más extendido en el Delt hasta la difusión de la actual nueva oferta tecnológica).

Integrando todos los criterios de selección: sanidad, crecimiento, forma, adaptación y aptitud tecnológica de la madera (Gráfico 2), es posible agrupar los cultivares según sus características, de manera de poder contar con herramientas para elegir la genética adecuada para las plantaciones.

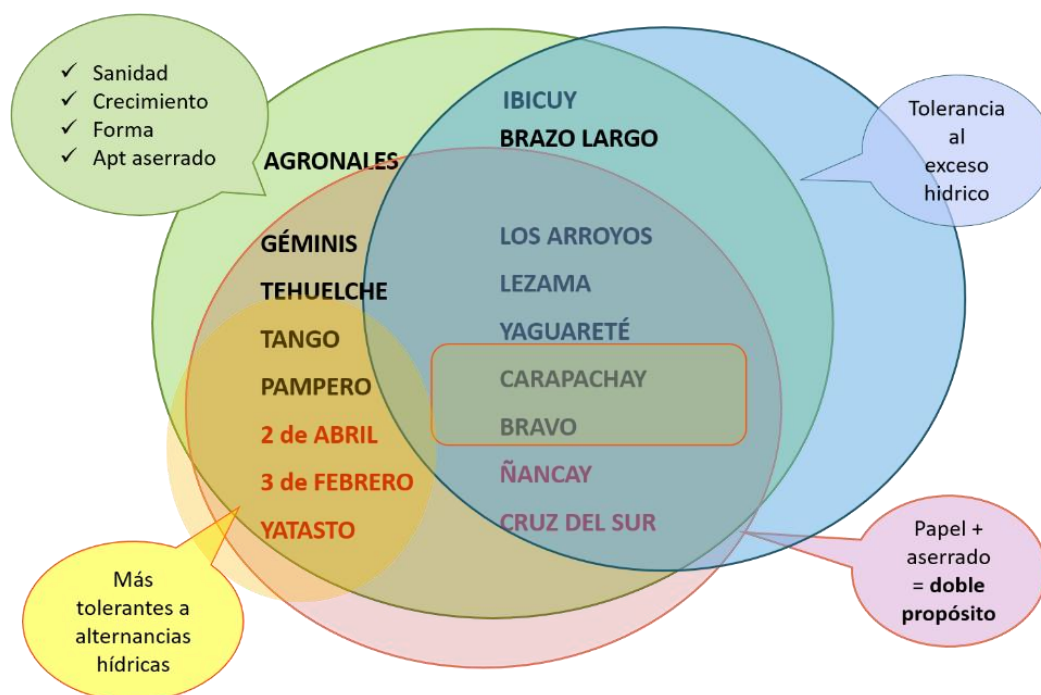


Gráfico 2. Perfil integral de los cultivares de sauce mejorados para producción forestal.



Cultivares de sauce nativo

Por sus características (Cuadro 2), los ocho clones poseen características de interés principal para usos ambientales; la disponibilidad de formas diversas y de ambos sexos proporciona opciones útiles para la planificación de este tipo de proyectos. Además, SAN PEDRO 1 INTA y DIAMANTE 7 INTA se destacan en el grupo por su mayor crecimiento y fustes rectos, confiriéndoles potencial productivo (se están completando estudios de calidad de la madera) y como progenitores para su aplicación en futuros programas de mejoramiento genético forestal.

Cuadro 2. Principales características de los cultivares de sauce nativo.

Nombre del cultivar	Origen	Año de registro	Sexo	Porte	Ángulo entre fuste principal y ramas	Pot. de uso
RIACHO VICTORIA 1 INTA	Victoria, Entre Ríos	2024	F	s.c.	agudo	(*)
RIACHO VICTORIA 4 INTA	Victoria, Entre Ríos	2024	M	s.c.	agudo	(*)
COSTA DE DIAMANTE 1 INTA	Diamante, E. Ríos	2024	F	s.c.	agudo	(*)
COSTA DE DIAMANTE 3 INTA	Diamante, E. Ríos	2024	F	s.c.	Agudo a recto	(*)
COSTA DE DIAMANTE 5 INTA	Diamante, E. Ríos	2024	F	d.	Agudo a recto	(*)
RIBERA DEL RÍO CARABELAS INTA	Campana, Bs. As.	2025	F	s.c.	Agudo	(*)
SAN PEDRO 1 INTA	San Pedro, Bs.As.	2025	M	d.	Agudo	(**)
COSTA DE DIAMANTE 7 INTA	Diamante, E. Ríos	2026	F	d.	Agudo	(**)

Potencial de uso:

(*) **Ambientales** (fitorremediación, restauración de ecosistemas)

(**) Ambientales + **producción**, en función del mayor crecimiento y forma recta del árbol.

Forma: **s.c.:** suavemente curvado - **d.:** derecho

Cultivares de mimbre

Los cinco clones mejorados y registrados en INASE se caracterizan por atributos diferenciales (Cuadro 3) de valor para sumar diversidad en un cultivo para el cual se disponía de una base genética muy estrecha, basada mayoritariamente en dos clones (macollado Verde y macollado Amarillo).

Cuadro 3. Principales características de los cultivares de sauce-mimbre.

Nombre del cultivar	Cruzamiento	Sexo	Brotación (B) y fin de crecimiento (FC)	Rebrote	Flexibilidad	Adaptación a sitios bajos
AVE FÉNIX INTA	<i>Salix viminalis</i> x <i>Salix viminalis</i>	F	B: Medio FC: Tardía	+++	3	+++
SAN MARTÍN INTA	<i>Salix viminalis</i> x <i>Salix viminalis</i>	F	B: Temprana/Medio FC: Medio/Tardía	++	3	+++
DON PATRICIO INTA	<i>Salix viminalis</i> x <i>Salix caprea</i>	M	B: Temprana/Medio FC: Medio	++	2/3	++
MARCOS SASTRE INTA	<i>Salix viminalis</i> x <i>Salix caprea</i>	F	B: Medio/Tardía FC: Medio/Tardía	++	3	++
SARMIENTO INTA	<i>Salix viminalis</i> x <i>Salix caprea</i>	M	B: Tardía FC: Tardía	++	2	++

Características comunes a los 5 cultivares: buena sanidad y crecimiento; excelente capacidad de rebrote.

Flexibilidad, valoración empírica, considerando el % de ramas (en estado verde) que quiebran al doblarse en un ángulo de más de 360°: 1. Quiebra más del 25%. 2. Quiebra hasta el 25% (similar a lo observado en el clon tradicional *Salix viminalis* 'Macollado Amarillo'). 3. No quiebran y toleran la torsión (similar al clon tradicional *Salix fragilis* "Negro"). En los 5 cultivares seleccionados la flexibilidad se mantuvo luego del proceso de hervido en calderas.

Todos registrados en 2022 en INASE.



4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de cultivares para la foresto-industria validan la metodología desarrollada en el Programa de Mejoramiento Genético, basado en una amplia variabilidad y selección integradora de aspectos adaptativos, productivos y tecnológicos. Asimismo, la adaptación de este programa para la elaboración de las líneas para sauce nativo y de mimbre es otro resultado de este.

Las características adaptativas de estos materiales mejorados a limitantes ambientales, como excesos de humedad y/o salinidad, junto a los perfiles tecnológicos de la madera, constituyen una herramienta clave de buenas prácticas: la elección de la genética adecuada según el sitio y los objetivos del proyecto.

Los cultivares desarrollados de “sauce criollo”, los primeros de la especie en cumplir con la inscripción en el INASE, proporcionan la certeza de disponer de material genético con pureza varietal y trazabilidad, representando una oportunidad para incorporarlos al ámbito viverista a través de material certificado. Por su parte, los nuevos clones de mimbre constituyen una alternativa de calidad para integrar a la escasa disponibilidad de clones tradicionales, sustentada casi exclusivamente en dos únicos clones. Los treinta cultivares desarrollados en total se encuentran inscriptos en el Registro Nacional de Cultivares (RNC) del INASE, lo cual brinda la oportunidad de contar con materiales de estatus certificado en los viveros, contribuyendo a la trazabilidad, entre otros factores. En los tres grupos de sauces, la nueva oferta tecnológica constituye un aporte clave de diversidad genética a las plantaciones, fortaleciendo el sistema basado en propagación agámica.

5. LITERATURA CITADA

- ÁLVAREZ, J.L. 2008. Sustentabilidad de las empresas familiares como base del Desarrollo Local. El caso de las empresas familiares mimbrenas del Delta Bonaerense del Río Paraná, luego de la crisis de 2001. Tesis de Maestría de la Universidad de San Martín - 85p. Bs.As.
- BORODOWSKI, E. 2022. Plantaciones Forestales en Argentina. Disertación en V Jornadas Técnicas sobre el Sauce, San Fernando, 10-11 de noviembre de 2022.
- CASABÓN, E.; CERRILLO, T. G. MADDOZ. 2018. Instalación de Sistemas Silvopastoriles en el Delta del Paraná: Comportamiento de barbados de sauce como material de propagación. Actas. IV Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles- 1ª ed. San Carlos de Bariloche: Ed. INTA, 2018. 749 p. Libro digital. ISSN: 1667-4014
- CERRILLO, T.; MONTEVERDE, M.S., S. ORTIZ. 2013. Nuevos clones mejorados de sauce (*Salix* spp). IV Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano- AFoA-INTA-FAO. Iguazú, Misiones, Argentina. Sept. de 2013.
- CERRILLO, T. 2022. Primeros cultivares de sauces-mimbre obtenidos por mejoramiento genético en Argentina. First willow cultivars for basket making obtained by genetic improvement in Argentina. IX Reunión GeMFO / editado por Juan Adolfo López. 2022. Libro digital, PDF Archivo Digital: descarga y online ISBN 978-987-88-6537-9.
- CERRILLO, T.; THOMAS, E.; GRANDE. 2025a. Presentación de nuevos sauces mejorados para producción maderera recientemente inscriptos en el INASE. Libro de Actas de las XXXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. ISSN 2796-7530. Pág. 56. Concordia, noviembre de 2025.
- CERRILLO, T.; POMPONIO, MF, DIETA, V; LOVAL, S; TORALES, S. 2025b. Primeros clones registrados de *Salix humboldtiana* Willd. Libro de Actas de las XXXIX JFER. ISSN 2796-7530. Pág. 61. Concordia, nov. de 2025.
- GRANDE, J. 2025. Validación de Sauces Mejorados a escala industrial para el proceso de Papel Prensa. Disertación en las VII Jornadas Técnicas sobre el Sauce, San Fernando, 12-13 de noviembre de 2025. https://youtu.be/P9toZejgK8?si=_jM2ixiQUwJvse8u
- ROMAGNOLI, S.; SCANDROGLIO, R.; IRRAZÁBAL, J.; THOMAS, E.; CERRILLO, T. 2022. Evaluation of improved willow clones for phytoremediation urban solid waste landfill in Lamarque (Río Negro, Argentina). IUFRO 8th International Poplar Symposium (IPS VIII), October 4-6, 2022, Hosted by: The Institute of Lowland Forestry and Environment, Novi Sad, Serbia <https://ips2022.ilfe.org/>
- THOMAS, E.; PONCE, V. 2025. Evaluación de nuevos clones de sauce en los valles de Patagonia Norte. Disertación en las VII Jornadas Técnicas sobre el Sauce, San Fernando, 12-13 de noviembre de 2025. <https://www.youtube.com/watch?v=WHrDFBDadrc>



FERTILIZACIÓN INICIAL DE CLONES DE *Eucalyptus grandis* CON CENIZAS DE CALDERA DE BIOMASA FORESTAL

Alejandro Daniel MAGGIO¹, María José IERMANÓ¹, Ramon Marcelo CANTEROS¹, Oscar REY¹, Daniel GOMEZ¹, Juan Pablo ZABALA²

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar la respuesta del crecimiento de clones de *E. grandis* bajo distintos tratamientos de fertilización inicial. El estudio se realizó en un módulo experimental instalado en la EEA INTA Bella Vista, donde se evaluaron los clones DDT002136 de POMERA (P2136) y EG-INTA-157 de INTA (I157). Se aplicaron cuatro tratamientos: ceniza (C), ceniza + urea (CU), fosfato diamónico (FD) y un testigo sin fertilización (T). Las variables medidas fueron el diámetro (DAP) y altura (H). El análisis conjunto mostró que la fertilización influyó significativamente en ambas variables, destacándose los tratamientos con FD, que alcanzaron los mayores valores de DAP y H. El tratamiento CU presentó una respuesta intermedia, mientras que C y T exhibieron los menores crecimientos. Al evaluar los resultados por clon, el I157 mostró una marcada respuesta a la fertilización inicial, con efectos significativos en DAP y H. El FD se diferenció del testigo, mientras que CU alcanzó valores intermedios. En contraste, el P2136 no evidenció respuestas significativas a los tratamientos, aunque FD presentó los mayores promedios. Bajo las condiciones evaluadas, la ceniza sola no resultó adecuada para reemplazar la fertilización fosfatada, aunque su potencial podría explorarse en futuros ensayos con otras dosis o combinaciones.

Palabras clave: *silvicultura clonal; fertilizantes minerales; suelos arenosos.*

1. INTRODUCCIÓN

Corrientes es la principal provincia forestada y de mayor potencialidad de la región. Posee más de 500.000 hectáreas forestadas entre los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*, representando el *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden el 31 % de dichos recursos (CFI, 2018). La provincia posee una superficie disponible con aptitud forestal de aproximadamente 3.000.000 hectáreas (PEFIC, 2013), las cuales son marginales para otras producciones, excepto la ganadería. Las lomas y planicies arenosas ocupan más de 1.000.000 de hectáreas. Son suelos que pertenecen al orden Entisoles, presentan muy baja fertilidad natural, bajo contenido de materia orgánica y condiciones de hidromorfismo que limitan el crecimiento de *E. grandis* (Escobar et al., 1996). Esta situación exhibe como desafío la elección de materiales genéticos específicos y una silvicultura sitio específica para las condiciones particulares de estos suelos (Aparicio y Maggio, 2018). Las plantaciones clonales de *E. grandis* están en continua expansión, debido a la mayor oferta de materiales genéticos adaptables a diferentes condiciones edafoclimáticas, al aumento de la productividad y a que el *Eucalyptus* sp. ha demostrado su versatilidad para producir una amplia gama de productos, como madera aserrada, postes, tijeras, varas, entre otros (Sánchez Acosta, 2006).

El sostenimiento de la productividad de las plantaciones forestales intensamente manejadas requiere mantener la capacidad productiva y la fertilidad del suelo (O'Connell et al., 2004; Stahringer et al., 2018). La fertilización de *E. grandis* es una técnica habitual que se aplica en el establecimiento de forestaciones localizadas en suelos de baja fertilidad natural (Aparicio y Maggio, 2018). El objetivo es lograr una ocupación temprana del sitio y aumentar la productividad desde el inicio del ciclo. En general, se utilizan fertilizantes minerales comerciales para realizar estas prácticas, aunque, en los últimos años, surge el interés en la exploración de otras alternativas de fertilización.

¹ INTA EEA Bella Vista. maggio.alejandro@inta.gob.ar

² Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial



La ceniza resultante de la quema de biomasa forestal en calderas para la generación de energía eléctrica es un material mineral que tiene potencial para diversos usos. Con alto pH, está principalmente compuesta por sales minerales, con predominio de calcio y sílice (Supancic et al., 2014). Los nutrientes y su proporción en la ceniza dependen de la materia prima que le da origen (pino, eucalipto, etc.) y del proceso de combustión (Albuquerque et al., 2021).

Por el volumen generado y sus características, es necesario gestionar este residuo de la industria (Supancic et al., 2014). Es posible su reutilización como fertilizante (mineral o compostaje) o como enmienda química, reincorporando los nutrientes al sistema de producción y favoreciendo su reciclaje (Kuba et al., 2008; Maresca et al., 2018; Albuquerque et al., 2021). Estas alternativas aún no fueron muy estudiadas en Argentina, por lo que es relevante avanzar en la experimentación de su potencial.

El objetivo del trabajo fue evaluar la respuesta de 2 clones de *E. grandis* a los 12 meses de edad bajo diferentes tratamientos de fertilización inicial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en un módulo experimental de fertilización inicial de clones de *E. grandis* instalado en la EEA INTA Bella Vista, ubicada en el Departamento Bella Vista, Municipio Tres de Abril, provincia de Corrientes, Argentina.

Se evaluó la respuesta de los clones DDT002136 de POMERA y el EG INTA 157 en 4 tratamientos de fertilización inicial: 1) 300 g árbol⁻¹ de ceniza fina (C), 2) 300 g árbol⁻¹ de ceniza fina y 50 g árbol⁻¹ de urea (CU), 3) 100 g árbol⁻¹ de fosfato diamónico (FD), 4) testigo sin fertilizar (T). Las cenizas utilizadas se obtuvieron de una caldera de biomasa forestal para la generación de energía eléctrica. Para alimentar la caldera se utilizan residuos de aserradero de pino y eucalipto, en proporciones que varían de acuerdo con la oferta de residuos. En la Cuadro 1 se brindan las principales características químicas de las cenizas de caldera de biomasa forestal utilizadas.

Cuadro 1. Características químicas de las cenizas de biomasa forestal utilizadas, provenientes de una planta de generación de energía eléctrica en la provincia de Corrientes.

pH	CE	C/N	MO	CO-T	NT	P	K	Ca	Mg	Na
9,0	0,76	44	5,5	3,1	0,07	0,15	0,62	3,05	0,39	1,15

pH: potencial de hidrógeno, CE: conductividad eléctrica (dS m⁻¹), C/N: relación Carbono Nitrógeno (%), MO: Materia orgánica (%), CO-T: Carbono orgánico total (%), NT: Nitrógeno total (%), P: Fósforo (%), K: Potasio (%), Ca: Calcio (%), Mg: Magnesio (%), Na: Sodio (%)

La plantación del módulo se realizó en noviembre de 2024 con una densidad de 1250 árboles ha⁻¹ (2 m x 4 m), en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Cada parcela está compuesta por 60 árboles. El tamaño de plantas para la instalación del módulo experimental fue de 20 cm de altura, las mismas fueron donadas por el vivero Brest y Brest. La fertilización se realizó a los 20 días de la plantación, incorporando los fertilizantes en dos orificios a 30 cm de la planta.

Para evaluar la respuesta de los clones a los diferentes tratamientos de fertilización inicial, se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) y la altura total (H, m) de los árboles a los 12 meses de edad.

Los datos de DAP y altura se analizaron mediante ANOVA, previa verificación de normalidad y homogeneidad de varianzas. Se aplicó un modelo factorial con clon y tratamiento y, ante la ausencia de interacción significativa, se realizaron ANOVA por clon y comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto general de los tratamientos de fertilización en ambos clones

El análisis conjunto de los datos de crecimiento indicó que los tratamientos de fertilización influyeron significativamente sobre el DAP ($p = 0,0125$) y la H de los árboles ($p = 0,0233$). Asimismo, el factor clon presentó un efecto significativo sobre ambas variables (DAP $p = 0,0005$, H $p = 0,0280$), evidenciando

diferencias genéticas en el crecimiento inicial a favor del clon DDT002136. En contraste, la interacción entre clon y tratamiento no resultó significativa ($p = 0,4884$), indicando que, si bien los clones difieren en su desempeño general, el patrón de respuesta a los tratamientos de fertilización es similar entre ellos.

La comparación de medias mostró que los tratamientos que incluyeron fertilización con FD, presentaron los mayores valores promedio de DAP y H (Gráfico 1). El tratamiento de CU evidenció una respuesta intermedia, mientras que C y T mostraron los menores valores de crecimiento. Este patrón general indica que la disponibilidad de fósforo y nitrógeno constituye un factor determinante en el crecimiento inicial de *E. grandis* bajo las condiciones del ensayo (Aparicio et al., 2004; Graciano et al., 2015, Aparicio y Maggio, 2018). Los suelos del sitio de estudio se caracterizan por contenidos muy bajos de carbono y nitrógeno, niveles limitantes de fósforo y deficiencia de potasio (Escobar et al., 1996), por lo que la respuesta diferencial de los tratamientos también puede explicarse por su capacidad para compensar estas limitaciones.

De acuerdo con los requerimientos nutricionales de *E. grandis* reportados por Stahringer et al. (2018), la fertilización inicial con 300 g de C por árbol aportó cantidades marginales de nitrógeno y fósforo (menos del 3 %), por lo que no resulta adecuada para el aporte de estos nutrientes en la etapa de establecimiento. Sin embargo, tuvo un mayor crecimiento comparado con el T (sin diferencias estadísticas significativas), lo que podría estar asociado al aporte de bases de las cenizas, especialmente calcio, mejorando el ambiente edáfico del micrositio de plantación. La respuesta intermedia observada en el tratamiento CU sugiere que el nitrógeno puede contribuir al crecimiento inicial (Aparicio et al., 2004), manteniendo el efecto correctivo de bases, aunque mantiene la deficiencia de fósforo. Por su parte, FD aportó una elevada dosis de fósforo y nitrógeno inicialmente, aunque sin contribución de potasio, calcio o magnesio. En consecuencia, mientras que el FD puede considerarse un fertilizante efectivo desde el punto de vista del balance nutricional, la C cumpliría un rol principalmente como enmienda del suelo, sin corregir los nutrientes primarios deficitarios.

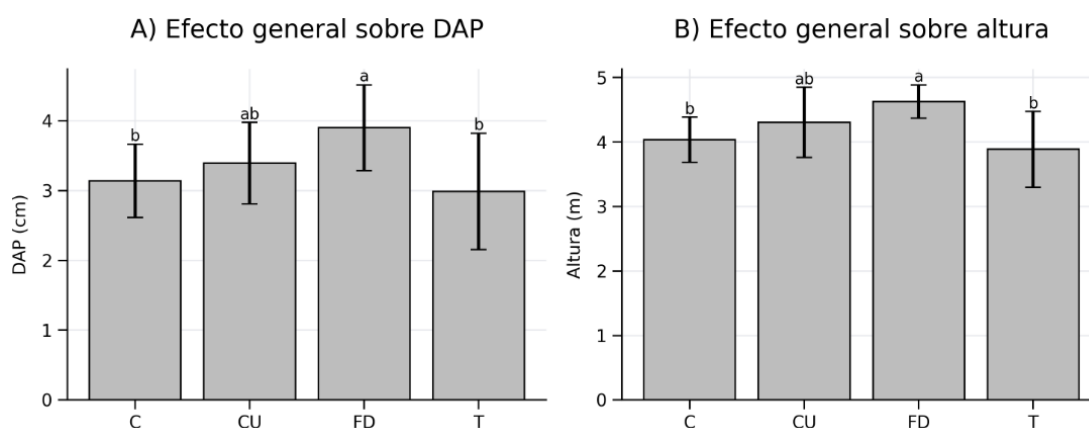


Gráfico 1. Efecto general de los tratamientos de fertilización sobre el crecimiento inicial de *E. grandis*. (C: ceniza, CU: ceniza + urea, FD: fosfato diamónico, T: testigo). Las barras representan medias $\pm$ desviación estándar considerando ambos clones. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Varios autores reportaron el uso de cenizas en dosis que superan la tonelada por hectárea, lo que actuaría como una enmienda química (Maresca et al., 2018). Bellote et al. (1995) reportaron aumentos considerables de volumen maderable con el uso de ceniza de caldera asociada con fertilización química en plantaciones de *E. grandis*, en suelos de baja fertilidad natural, utilizando dosis de 50 t ha^{-1} . En este estudio se adoptó un enfoque precautorio en la definición de las dosis de cenizas aplicadas, dado que no se dispone de información analítica detallada sobre su contenido de elementos potencialmente tóxicos, cuya determinación implica elevados costos, limitante frecuente en la evaluación de este tipo de subproductos. Asimismo, se consideraron las restricciones operativas asociadas al manejo, transporte y aplicación a campo de grandes volúmenes de material, factores que condicionan la factibilidad y escalabilidad del uso de cenizas como insumo en plantaciones forestales.

Respuesta diferencial de los tratamientos según el clon

Al analizar los resultados por clon (Gráfico 2), el clon EG INTA 157 mostró una clara respuesta a la fertilización inicial. En este clon, el efecto del tratamiento fue significativo tanto para el DAP ($p = 0,0409$) como para la H ($p = 0,0162$). El tratamiento FD presentó los mayores valores medios de crecimiento en ambas variables, diferenciándose significativamente del T. El tratamiento CU mostró valores intermedios, sin diferencias significativas respecto al tratamiento FD, pero superando al T y al tratamiento C.

La ausencia de diferencias significativas entre la aplicación de ceniza sola y el testigo indica que, en las condiciones evaluadas, la ceniza sola no fue suficiente para generar incrementos apreciables en el crecimiento inicial del clon EG INTA 157. Estos resultados muestran que este clon presenta una alta respuesta a la fertilización con fósforo y nitrógeno, lo que sugiere una mayor dependencia de la disponibilidad de estos minerales durante las primeras etapas de crecimiento (Aparico y Maggio, 2018).

En contraste, en el clon DDT002136 no se observaron efectos significativos de los tratamientos de fertilización sobre el DAP ($p = 0,2242$) y sobre la H ($p = 0,5302$), aunque el tratamiento FD mostró los valores medios más altos de DAP y H. Este comportamiento sugiere que el clon DDT002136 presenta una menor sensibilidad a la fertilización inicial, o bien una mayor eficiencia en el uso de los nutrientes disponibles en el suelo durante la etapa de establecimiento. Esta menor respuesta podría estar asociada a características fisiológicas propias del material clonal, como un sistema radical más eficiente o una mayor capacidad de tolerar condiciones de baja fertilidad.

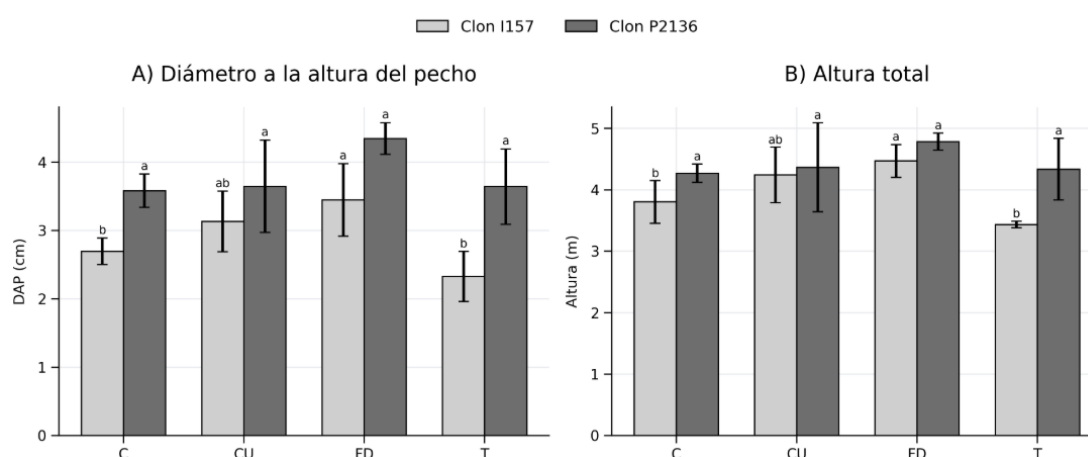


Gráfico 2. Respuesta del crecimiento inicial de los clones I157 y P2136 de *E. grandis* a diferentes tratamientos de fertilización inicial (C: ceniza, CU: ceniza + urea, FD: fosfato diamónico, T: testigo). Las barras representan valores medios $\pm$ desviación estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos por clon según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

La respuesta diferencial observada entre clones refuerza la importancia de considerar el material genético al definir esquemas de fertilización en plantaciones de *E. grandis*. Si bien el análisis conjunto mostró un efecto positivo general de la fertilización fosfatada, la magnitud de la respuesta varió entre clones. Desde una perspectiva operativa, la ausencia de interacción significativa clon $\times$ tratamiento sugiere que los esquemas de fertilización pueden aplicarse de manera general, aunque los beneficios esperados en términos de crecimiento inicial dependerán del clon implantado.

4. CONCLUSIONES

Los resultados indican que el FD fue el tratamiento más efectivo para promover el crecimiento inicial de clones de *E. grandis*, confirmando al fósforo y el nitrógeno como nutrientes clave en la etapa de establecimiento. La aplicación de C sola, con su escaso contenido de fósforo y nitrógeno, no logró sustituir de manera efectiva al FD, ya que no produjo crecimientos estadísticamente significativos en DAP y H respecto del T, especialmente en el clon con mayor respuesta a la fertilización.



En consecuencia, bajo las dosis y condiciones evaluadas, la utilización de ceniza sola no resulta una alternativa adecuada para reemplazar la fertilización fosfatada mineral en la implantación temprana. No obstante, dado el potencial de la ceniza como fuente de nutrientes y enmienda del suelo, su uso podría seguir siendo explorado mediante ensayos con mayores dosis, diferentes formulaciones o combinaciones, así como en sitios con características edáficas contrastantes, antes de descartarla como opción complementaria dentro de esquemas de manejo nutricional más amplios.

5. LITERATURA CITADA

- ALBUQUERQUE, A.; ANGÉLICA, R.S.; MERINO, A.; PAZ, S. 2021. Chemical and mineralogical characterization and potential use of ash from Amazonian biomasses as an agricultural fertilizer and for soil amendment, Journal of Cleaner Production, Volume 295. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126472>
- APARICIO, J.L.; MONTICELLI, C.; GHIO, A. 2004. Fertilización de *Eucalyptus grandis* con NPK y micronutrientes: Respuesta en suelos arenosos del sudoeste de Corrientes. In: XIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos.
- APARICIO, J.L.; MAGGIO, A. 2018. Respuesta a la fertilización con NPK en 5 clones de *Eucalyptus grandis* en planicies arenosas de Corrientes. XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia. pp. 93-121.
- BELLOTE, A. F.; FERREIRA, C. A.; DA SILVA, H. D.; ANDRADE, G. D. C. 1995. Efecto de la aplicación de ceniza de caldera y residuo de celulosa en el suelo y en el crecimiento de *Eucalyptus grandis*. Bosque, 16(1), 95-100.
- CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES (CFI). 2018. Actualización del inventario forestal de bosques implantados en la provincia de Corrientes, Argentina. Informe técnico. 45 p.
- ESCOBAR, E.H.; LIGIER, H.D.; MELGAR, R.; MATTEIO, H.; VALLEJOS, O. 1996. Mapa de suelos de la provincia de Corrientes. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales. EEA Corrientes. 432 pp.
- GRACIANO, C.; GOYA, J.F.; ARTURI, M.; BURNS, S.L.; PÉREZ, C. 2015. Fertilización de *Eucalyptus grandis* en el NE de Entre Ríos: resultados al turno y algunas implicancias para el manejo de las plantaciones. XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia.
- KUBA, T.; TSCHÖLL, A.; PARTL, C.; MEYER, K.; INSAM, H. 2008. Wood ash admixture to organic wastes improves compost and its performance, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 127, Issues 1–2. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.02.012>
- MARESCA, A.; HANSEN, M.; INGERSLEV, M.; ASTRUP, T.F. 2018. Column leaching from a Danish forest soil amended with wood ashes: fate of major and trace elements, Biomass and Bioenergy, Volume 109. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.014>
- O'CONNELL, A.M.; GROVE, T.S.; MENDHAM, D.S.; RANCE, S.J. 2004. Impact of harvest residue management on soil nitrogen dynamics in Eucalyptus globulus plantations in south western Australia. Soil Biol Biochem 36:39–48.
- PEFIC (Plan estratégico foresto industrial de la provincia de Corrientes). 2013. Disponible en: <https://apefic.org.ar/>
- SÁNCHEZ ACOSTA, M. 2006. Productos sólidos a partir de madera de eucaliptos cultivados. Boletín Informativo CIDEU (2): 103-117.
- STAHRRINGER, N.I.; NEVES, J.C.L.; PAULUCIO, R.B.; TEIXEIRA, J.L.; SUSSINI, P.A.; ARGÜELLES, R.T.; CHAMORRO, L.L. 2018. Recomendación de fertilizantes para Pinus y Eucalyptus en Corrientes, Argentina utilizando balance nutricional. IAH Versión Cono Sur, 14.
- SUPANCIC, K.; OBERNBERGER, I.; KIENZL, N.; ARICH, A. 2014. Conversion and leaching characteristics of biomass ashes during outdoor storage – Results of laboratory tests, Biomass and Bioenergy, Volume 61. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.014>



APLICACIÓN DE MODELOS NO LINEALES MIXTOS PARA EL AJUSTE DE UN MODELO HIPSONÉTICO PARA *Eucalyptus grandis* EN ENTRE RÍOS

María de los Ángeles GARCÍA¹, Aldo KELLER²

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue ajustar y validar un modelo hipsométrico para *Eucalyptus grandis* mediante modelos no lineales mixtos. Con 16198 pares de dap-altura de árboles de 2 a 16 años de 69 parcelas de ensayos en suelo arenoso, mestizo y arcilloso de Entre Ríos se ajustaron y evaluaron modelos de efectos fijos y con efecto aleatorio de planta sobre los parámetros. Para evaluar los ajustes se compararon los estadísticos AIC y BIC. Luego, se modeló la heterogeneidad de varianzas. El modelo con efecto aleatorio sobre tres parámetros y varianzas heterogéneas según desvío estándar de los residuos presentó el mejor ajuste (AIC 48928,2; BIC 49043,6) en comparación con el modelo ajustado solo con efectos fijos (AIC 58333,7; BIC 58372,2). Finalmente, con 9872 pares dap-altura de árboles de nuevas parcelas de ensayos y lotes demostrativos se validó el mejor modelo. Los estadísticos error absoluto medio (0,91 m), error cuadrado medio (1,63 m²), raíz del error cuadrado medio (1,28 m) y error relativo medio (5,4 %) indican una mejora del valor predictivo respecto del modelo regional de efectos fijos sin aumentar el costo de muestreo.

Palabras clave: altura; eucaliptos; estimación; efectos aleatorios; valor predictivo

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios en las ciencias forestales, como medidas repetidas en el tiempo, curvas de crecimiento, experimentos multiambientales, que no cumplen los supuestos de independencia, normalidad, igualdad de varianzas o linealidad, presentan características que dificultan la aplicación de modelos clásicos (Casanoves et al., 2005; Mora-Chacón et al., 2022). El enfoque de modelos de efectos mixtos se utiliza cada vez más como un método estadístico alternativo para hacer frente a esos problemas, pues permite incorporar variables aleatorias y modelar la matriz de correlaciones entre observaciones (Casanoves et al., 2005; Ercanli, 2015). Un modelo no lineal mixto explica el valor esperado de una observación a través de variables regresoras y factores de tratamiento, condicionado a uno o más efectos aleatorios.

Cuando se estudia el crecimiento mediante medidas repetidas sobre un mismo individuo, o cuando los datos tienen estructura jerárquica, la incorporación de diversas estrategias de modelos mixtos mejora la precisión de las estimaciones y se amplía el espacio de inferencia (Casanoves et al., 2005). Cuando se ajustan modelos hipsométricos para aplicarse a grandes áreas, las estimaciones mejoran si se agregan variables de rodal, como edad, densidad, y medidas de productividad (Scolforo et al., 2015). Hofiço et al. (2020) aplicó modelos mixtos para ajustar relaciones hipsométricas para *Eucalyptus grandis*, logrando mejor ajuste y mayor precisión que con los modelos no lineales tradicionales. Ogana y Gorgoso-Varela (2020) reportan que el uso de modelos no lineales mixtos en el reajuste de funciones de altura para pino marítimo, donde se incorporó información de las parcelas en la componente aleatoria, permitió mejorar la estimación de los parámetros y los estadísticos de ajuste en comparación con los mismos modelos sin efectos aleatorios.

El modelo hipsométrico disponible para eucaliptos para la región agroecológica Concordia-Monte Caseros se ajustó y validó a partir de datos de rodales con diferentes densidades, edades y calidades de sitio (Fassola et al., 2007), con técnicas de modelado no lineal de efectos fijos. Ese modelo requiere

¹ Departamento Forestal, INTA Concordia, Ruta 22 y vías FFCC, Estación Yuquerí, Concordia (Entre Ríos). garcia.mariaa@inta.gob.ar

² Silvicultura, INTA EEA Montecarlo (Misiones).



pocas mediciones de altura, reduciendo costos en inventarios comerciales. Sin embargo, su valor predictivo podría mejorarse incorporando información en la componente aleatoria.

El objetivo de este trabajo fue ajustar y validar la relación hipsométrica de Fassola et al. (2007) para eucaliptos del sur de Corrientes y NE de Entre Ríos a partir de una base de datos nueva aplicando modelos no lineales mixtos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se consolidaron dos conjuntos de datos: uno para el reajuste del modelo hipsométrico y otro para la validación del modelo seleccionado. El primero, con 16198 registros de pares dap-altura (Cuadro 1) de árboles individuales de edades de 2 a 16 años, que incluye datos longitudinales (medidas repetidas del mismo individuo a lo largo del tiempo) y datos transversales (medidos una sola vez) de 69 parcelas repartidas en 3 ensayos de raleo de *Eucalyptus grandis* ubicados en tres sitios de la provincia de Entre Ríos, con suelos arenoso (Concordia, 31°22'06,27"S; 58°06'55,12"O), mestizo (Concepción del Uruguay, 32°29'41,38"S; 58°20'43,25"O) y arcilloso (Colón, 31°43'44,08"S; 58°19'23,49"O).

Cuadro 1. Rangos de valores del conjunto de datos de ajuste

Suelo	Registros	dap (cm)	Altura total (m)	Densidad (plantas/ha)
arenoso	4418	4,6-49,5	6,6-43,4	174-1043
mestizo	5157	2,0-60,3	2,3-50,9	159-1062
arcilloso	6623	9-46,5	13,6-43,9	156-1038

El conjunto de datos de validación cuenta con 9872 registros de pares dap-altura de árboles individuales de edades de 2 a 16 años, incluyendo datos longitudinales y transversales de 76 parcelas de ensayos y lotes demostrativos de raleo y espaciamiento inicial de *Eucalyptus grandis* en los tres suelos característicos de la región (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rangos de valores del conjunto de datos de validación

Suelo	Registros	dap (cm)	Altura total (m)	Densidad (plantas/ha)
arenoso	3650	5,1-31,0	4,7-29,1	756-1129
mestizo	3536	5,0-42,8	4,1-35,0	150-1225
arcilloso	2686	8,0-49,5	12,5-40,0	102-1092

De cada parcela se calcularon las variables independientes del modelo hipsométrico de Fassola et al. (2007) para *Eucalyptus grandis* de la zona agroecológica Monte Caseros-Concordia (Ecuación 1).

$$alt = AltDom \times e^{((\alpha - \beta \times AltDom - \gamma \times \frac{N}{1000} - \delta \times edad) \times ((\frac{1}{dap}) - (\frac{1}{DAPmax})))} \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde alt=altura total (m); AltDom= altura dominante del rodal (m); N=densidad (plantas/ha); dap= diámetro normal (cm); DAPmax= diámetro normal máximo del rodal (cm); y los valores de los parámetros son: $\alpha=1,85238$; $\beta=0,25164$; $\gamma=2,9333$; $\delta=0,007211$.

Con el módulo Modelos no lineales mixtos de InfoStat (Di Rienzo, 2020), que se vincula a la plataforma R, se realizaron ajustes y se compararon mediante análisis de diagnóstico de los modelos ajustados.

Se aplicaron los métodos de estimación de máxima verosimilitud restringida (REML) para estimar los parámetros según los efectos fijos, y de verosimilitud aproximada por el método de Laplace (nlmer) para estimar los parámetros según efectos de los individuos. Se ajustaron 5 modelos. Primero se ajustó un modelo no lineal tradicional, sin efectos aleatorios. Luego, se evaluó la dependencia temporal de los datos obtenidos sobre un mismo árbol agregando un efecto aleatorio de "individuo" sobre los parámetros fijos del modelo: primero sobre α , luego sobre α y β , y así hasta incorporar el efecto aleatorio sobre los 4 parámetros.

Para seleccionar el mejor ajuste de la parte fija del modelo se tuvo en cuenta el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio bayesiano de información (BIC). Además, de cada modelo se evaluó el cumplimiento de los supuestos de homogeneidad y normalidad de los residuos mediante gráfico de

dispersión de los residuos condicionales estandarizados de Pearson en función de los valores predichos y gráfico Q-Q de los cuantiles muestrales en función de los cuantiles teóricos.

Mediante análisis de conglomerados, los residuos del mejor ajuste se clasificaron en 5 grupos según su desvío estándar (criterio de clasificación ensayo-parcela-edad, método de agrupamiento de Ward, distancia Euclídea). Se usó la función nlme para modelar las varianzas heterogéneas en un nuevo ajuste. Manteniendo la parte fija, se modeló la estructura de varianzas residuales con la función varIdent, indicando el conglomerado como criterio de agrupamiento. Se comprobó si se mejora el cumplimiento de los supuestos.

Finalmente, con el conjunto de datos de validación se calcularon los estadísticos de valor predictivo de los modelos: error absoluto medio (EAM), error cuadrado medio (ECM), raíz del error cuadrado medio (RECM) y error relativo medio (ERM, %).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo tradicional presentó el peor ajuste (AIC 58333,7; BIC 58372,2; parámetros: $\alpha = 2,00192$; $\beta = 0,12872$; $\gamma = 4,08029$; $\delta = 0,30993$) y se observó incumplimiento de los supuestos de distribución normal y homogeneidad de varianzas de los residuos (Gráfico 1). Se observan muchos árboles con valores absolutos de residuos estandarizados de Pearson superiores a lo admisible bajo normalidad y con alta variabilidad residual, para los que el modelo no ajusta bien.

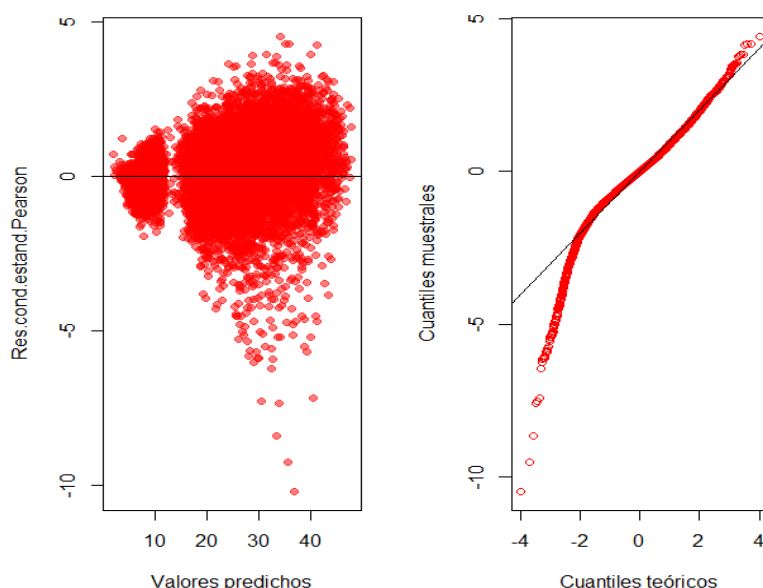


Gráfico 1. Residuos condicionales estandarizados de Pearson en función de los valores predichos (izquierda) y gráfico Q-Q de los cuantiles muestrales en función de los cuantiles teóricos (derecha) del modelo tradicional

El mejor ajuste de la parte fija se obtuvo con el modelo con efecto aleatorio sobre los 4 parámetros, con valores de AIC (50621,3) y BIC (50736,7) menores a los de los modelos con efecto aleatorio de planta sobre 1 (AIC 53841,7; BIC 53887,8), 2 (AIC 51476,2; BIC 51537,7) y 3 (AIC 51417,2; BIC 51501,8) parámetros. Sin embargo, en este modelo todavía se observa gran dispersión y cierta tendencia de falta de normalidad de los residuos (Gráfico 2).

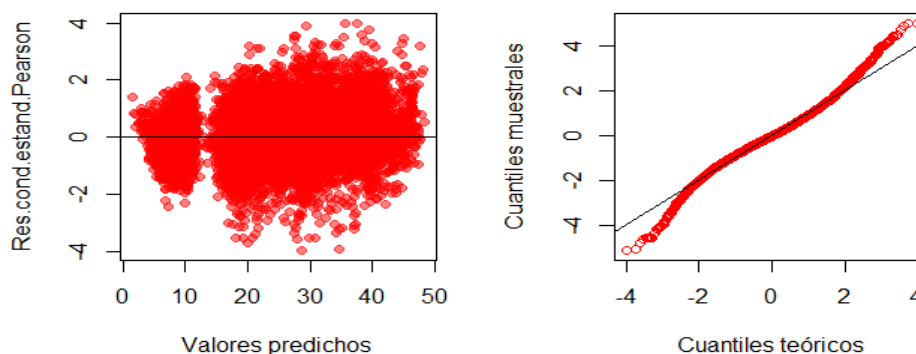


Gráfico 2. Residuos condicionales estandarizados de Pearson en función de los valores predichos (izquierda) y gráfico Q-Q de los cuantiles muestrales en función de los cuantiles teóricos (derecha) del modelo con efecto aleatorio de árbol sobre los 4 parámetros.

El modelo con varianzas heterogéneas y efectos aleatorios de planta sobre los cuatro parámetros no converge, lo que ocurre por sobreparametrización. Al quitar el efecto aleatorio sobre el parámetro δ , se reduce la dimensión de la matriz de varianzas-covarianzas que el modelo debe estimar. Por este motivo se seleccionó el modelo ajustado con efecto aleatorio de planta sobre los parámetros α , β y γ , y varianzas heterogéneas según el conglomerado que agrupa residuos con similar desvío estándar (ecuación 2). Este modelo presentó el mejor ajuste (AIC 48928,2; BIC 49043,6) y patrones aceptables de homogeneidad de varianzas y distribución de los residuos (Gráfico 3), en comparación con el modelo ajustado solo con efectos fijos.

$$alt = AltDom \times e^{((-1,70732 + 0,04064 \times AltDom - 2,11123 \times \frac{N}{1000} - 0,44212 \times edad) \times ((\frac{1}{dap}) - (\frac{1}{DAPmax})))}$$

(Ecuación 2)

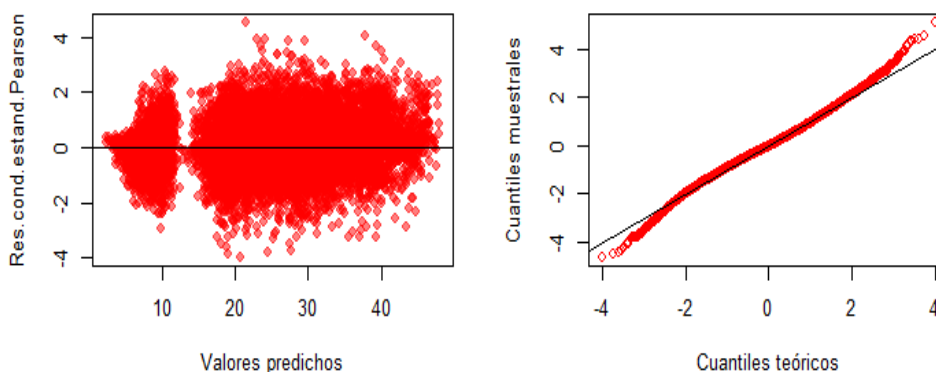


Gráfico 3. Residuos condicionales estandarizados de Pearson en función de los valores predichos (izquierda) y gráfico Q-Q de los cuantiles muestrales en función de los cuantiles teóricos (derecha) del modelo ajustado con los grupos de varianzas de los residuos y el efecto aleatorio de planta sobre los parámetros α , β y γ .

Se observa una mejora en el valor predictivo del modelo ajustado con efectos aleatorios respecto del modelo tradicional (cuadro 1). Se corrigió la normalidad y la heterocedasticidad de los residuos, supuestos que el modelo clásico no cumple, donde los residuos absorben toda la variabilidad individual. Esto provoca que los residuos tengan mayor varianza en ciertas zonas de la curva y distribución de los errores sesgada (no normalidad). Al pasar a un modelo mixto, añadiendo los efectos aleatorios, la mejora en el ajuste de los datos fue moderada. Sin embargo, la calidad estadística del modelo es superior porque los residuos cumplen con los supuestos teóricos fundamentales para poder hacer inferencia. Los estadísticos EAM y ERM de ambos modelos muestran mejor desempeño que el modelo de Fassola et al. (2007), para el cual EAM=1,7 m y ERM=7,4 %. Hofiço et al. (2020) muestran la mejora



en las estimaciones de altura de *Eucalyptus grandis* al incorporar a los modelos tradicionales basados en el dap, algunas variables del rodal como efectos aleatorios. Scolforo et al. (2015) también reportan mejora en las estimaciones de altura de *Eucalyptus* al agregar a modelos hipsométricos no lineales tradicionales covariables que indican la calidad del fuste. Ogana y Gorgoso-Varela (2020) reportan la reducción del 40 % de error cuadrático medio de un modelo hipsométrico para pino donde incluyeron el efecto aleatorio de árboles de cada parcela, en comparación con el modelo fijo.

Cuadro 1. Estadísticos de valor predictivo calculados con los modelos para el conjunto de datos de validación.

Indicador de valor predictivo	Modelo tradicional	Modelo con efectos aleatorios
Error absoluto medio (m)	0,94	0,91
Error cuadrado medio (m ²)	1,76	1,63
Raíz del error cuadrado medio (m)	1,32	1,28
Error relativo medio (%)	5,52	5,42

4. CONCLUSIONES

La incorporación de efectos aleatorios de planta y el modelado de varianzas heterogéneas permite que el modelo hipsométrico propuesto para *Eucalyptus grandis* supere la precisión del modelo de efectos fijos regional, sin aumentar el costo de muestreo.

5. LITERATURA CITADA

- CASANOVE, F.; BALZARINI, M.; MACCHIAVELLI, R. 2005. Aplicaciones de Modelos Mixtos en Agricultura y Forestería. Curso-Taller, 14-18 de marzo de 2005, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/283491085_Aplicaciones_de_Modelos_Mixtos_en_Agricultura_y_Foresteria
- DI RIENZO, J.A., CASANOVE, F., BALZARINI, M.G., GONZALEZ, L., TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2020. *InfoStat versión 2020*. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- ERCANLI, I. 2015. Nonlinear mixed effect models for predicting relationships between total height and diameter of Oriental beech trees in Kestel, Turkey. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 21(1):185-202. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2015.02.006.
- FASSOLA, H.; CRECHI, E.; KELLER, A.; BARTH, S.; FERNANDEZ TSCHIEDER., E. 2007. Informe técnico n° 61: Funciones y Algoritmos dasométricos para manejo silvícola intensivo, de aplicación en plantaciones forestales orientadas a producción de madera de alto valor agregado" PAN 571, Región Mesopotámica. *Pinus elliottii* y *Eucalyptus grandis*, parcial para *Pinus taeda*.
- HOFIÇO, N. S. A.; COSTA, E. A.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; HESS, A. F. 2020. Height-diameter relationships for *Eucalyptus grandis* Hill Ex. Maiden in Mozambique: using mixed-effects modeling approach. *CERNE* 26(2): 183-192. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/cerne/a/vV4g9tnDydn5dvJPbSHnjBp/?format=pdf&lang=en>
- MORA-CHACÓN, F.; JEREZ-RICO, M.; MEZA-PICADO, V.; CHINCHILLA-MORA, O.; CHAVES-SALAS, E. 2022. Modelos no lineales mixtos para la construcción de curvas de índice de sitio para *Tectona grandis* Linn. en la Vertiente del Pacífico de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales* 56(1): 28-53. DOI: <https://doi.org/10.15359/rca.56-1.2>
- OGANA, F. N.; GORGOSO-VARELA, J. J. 2020. A nonlinear mixed-effects tree height prediction model: Application to *Pinus pinaster* Ait in Northwest Spain. *Trees, Forests and People* 1. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2020.100003>
- SCOLFORO, H. F.; RAIMUNDO, M. R.; SCOLFORO, J.R.S.; MELLO, J.M.; BATISTA, A.P. B.; BULLOCK, B. 2015. Hypsometric approaches to *Eucalyptus* experiments in Brazil. *African Journal of Agricultural Research* Vol. 10(45): 4176-4184. DOI: 10.5897/AJAR2015.10151.



MODELO PARA ESTIMACIÓN DE VOLUMEN INDIVIDUAL DEL CLON GC-INTA-27 EN ENTRE RÍOS

María de los Ángeles GARCÍA¹, Leonel Harrand¹, Aldo KELLER², Matías MARTÍNEZ¹

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue ajustar un modelo de volumen individual con corteza para el clon híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis* GC-INTA-27 mediante modelos no lineales mixtos. Primero se ajustaron y compararon relaciones hipsométricas con datos de ensayos de *Eucalyptus grandis* y del híbrido. Luego, se apearon y cubicaron 152 árboles de 3 a 15 años de 4 rodales en suelos arenosos de Entre Ríos. Se tomaron 121 árboles para ajuste y 31 para validación. Se ajustó el modelo de Schumacher-Hall con efectos fijos y se modelaron las varianzas para corregir heterogeneidad de varianzas y falta de normalidad de los residuos. El mejor modelo de acuerdo con los estadísticos AIC y BIC resultó el que en su ajuste considera el efecto aleatorio de rodal y cuya fórmula final es: $\text{volumen} = 0,00003 \times \text{dap}^{1,843373} \times \text{altura}^{1,152326}$. Finalmente, los estadísticos error medio (EM=0,0002 m³) y error relativo medio (ERM=0,5 %) indican una mejor estimación para este clon que si se usa el modelo regional de volumen con corteza para *E. grandis* (EM=-0,0068 m³; ERM=-3,2 %).

Palabras clave: cubicación; eucalipto híbrido; modelos no lineales mixtos

1. INTRODUCCIÓN

Los clones híbridos interespecíficos de eucaliptos fueron desarrollados para sitios con condiciones limitantes para *E. grandis*, y seleccionados por forma, densidad de la madera, tolerancia a heladas, entre otras características (Harrand, 2005). De acuerdo con la Dirección de Desarrollo Foresto Industrial (2025), en Entre Ríos la superficie plantada con *Eucalyptus* es de 115 293 ha. En 2024, una encuesta a productores forestales de la provincia indicaba 3041,7 ha implantadas con clones híbridos (García et al., 2024), de los que uno de los más plantados es el GC-INTA-27, híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*. Si bien la estimación de volumen individual para cuantificar existencias de los rodales es parte de la información básica para la planificación del manejo, aprovechamiento y comercialización de las plantaciones, para la volumetría de eucaliptos híbridos se usa la ecuación de volumen de Fassola et al. (2007), ajustada y validada para *E. grandis* de la zona agroecológica Concordia-Monte Caseros. Sin embargo, diferencias en las relaciones entre las variables predictoras diámetro normal y altura total pueden resultar en la pérdida de precisión por errores mayores que los admitidos o sesgos en las estimaciones por utilizar un modelo para la especie pura, lo que justificaría el desarrollo de una ecuación local y específica para los híbridos clonales. El objetivo de este trabajo fue ajustar y validar una ecuación para la estimación del volumen con corteza de árboles del clon híbrido GC-INTA-27 y comparar su valor predictivo con el de la ecuación de volumen disponible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Con pares de datos de diámetro normal (dap)-altura de ensayos de 2 a 15 años de *E. grandis* (n=2238) y del clon GC-INTA-27 (n=540) instalados en distintos suelos típicos de Entre Ríos, se ajustaron relaciones hipsométricas logarítmicas (Ecuación 1) con modelos no lineales mixtos (MNLN) utilizando el software INFOSTAT integrado con R (Di Rienzo et al., 2020). Los modelos se compararon mediante prueba de razón de verosimilitud (Casanoves et al., 2005).

¹ Departamento Forestal, INTA Concordia, Ruta 22 y vías FFCC, Estación Yuquerí, Concordia (Entre Ríos). garcia.mariaa@inta.gob.ar

² Silvicultura, INTA EEA Montecarlo (Misiones).



$$h = \frac{\alpha}{(1 + e^{\frac{-(dap - \beta)}{\gamma}})} \quad \text{Ecuación 1,}$$

donde h: altura (m); dap: diámetro normal (cm); e: constante de Euler; α , β , γ : parámetros del modelo.

Luego, en 4 rodales del clon GC-INTA-27 plantados en suelos arenosos de Entre Ríos (31°15'55"S, 57°58'48"O; 31°21'36"S, 58°06'56"O; 31°21'58"S, 58°7'19"O; 31°16'4"S, 57°59'13"O), con edades de 3, 6, 8 y 15 años, se apearon, trozaron y cubicaron 152 árboles de todas las clases diamétricas presentes. De cada árbol apeado se midió la altura total (de base a punta de la copa) con cinta métrica, y los diámetros con corteza y sin corteza con forcípula en dos puntos perpendiculares entre sí en: base del primer rollizo, a 0,7 m, 1,3 m, 2 m y luego cada 2 m; el último rollizo se cortó a largo variable para alcanzar aproximadamente 5 cm de diámetro en la punta fina. De cada rollizo se registró el largo y los diámetros de ambas puntas. Para calcular el volumen de los rollizos se usó la fórmula de Smalian. El volumen de cada árbol se calculó como la suma de los volúmenes de los rollizos.

Los datos se separaron en dos conjuntos: uno para el ajuste del modelo volumétrico y otro para la validación del modelo seleccionado (Cuadro 1). Con MNLM se ajustó el modelo de Schumacher-Hall (Ecuación 2). Primero como un modelo no lineal tradicional, sin efectos aleatorios, aplicando los métodos de estimación de máxima verosimilitud (ML) y de verosimilitud aproximada por el método de Laplace (mediante `nlmmer`), procedimiento por defecto para estimar modelos mixtos no lineales.

Cuadro 1. Rangos de valores de los conjuntos de datos de ajuste y validación

Conjunto	Número de árboles	dap (cm)	altura total (m)
ajuste	121	5,1 - 33,0	8,0 - 35,5
validación	31	4,9 - 30,5	8,5 - 35,3

$$vol = b_0 \times dap^{b_1} \times h^{b_2} \quad \text{Ecuación 2,}$$

donde vol: volumen individual (m³); dap: diámetro normal (cm); h: altura total (m); b_0 , b_1 y b_2 : parámetros del modelo.

Mediante nuevos ajustes de la Ecuación 2, manteniendo la parte fija, se modelaron las varianzas heterogéneas. Para cada ajuste se comprobó gráficamente el cumplimiento de los supuestos de distribución normal y homogeneidad de varianzas de los residuos, seleccionando el modelo que mejor los corrigió.

Luego, se estimó el volumen de los árboles del conjunto de validación con el modelo de mejor ajuste para el clon híbrido y con el modelo de Fassola et al. (2007) para *E. grandis*. Finalmente, se calcularon los estadísticos error medio (EM, promedio de las diferencias entre volumen medido y volumen estimado) y error relativo medio (%) (ERM) para comparar el valor predictivo de los modelos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros de los modelos hipsométricos ajustados para *E. grandis* ($\alpha = 41,8774$; $\beta = 17,3382$; $\gamma = 7,3387$) y para GC-INTA-27 ($\alpha = 35,4996$; $\beta = 13,4391$; $\gamma = 6,1158$) y la prueba de razón de verosimilitud ($\Pr(>F) = 0,022$) indican que las relaciones dap-altura son diferentes para los dos materiales genéticos (Gráfico 1). Se observa que el clon híbrido alcanza una mayor altura que *E. grandis* para diámetros de hasta 25 cm, pero para diámetros mayores que 25 cm encuentra un límite de alrededor de 35 m de altura, mientras que *E. grandis* continúa su crecimiento. Esto señala que el modelo de estimación de volumen para *E. grandis* (Fassola et al., 2007) probablemente resulte inadecuado para GC-INTA-27. Scolforo et al. (2019) determinaron que es posible ajustar ecuaciones generalizadas para *Eucalyptus*, independientemente del clon. Keller (2024), en cambio, menciona antecedentes de ajustes de modelos de estimación de altura, ahusamiento y volumen específicos para diferentes especies y clones, y explica que los errores de estimación pueden aumentar cuando los modelos provienen de datos de diferentes rangos de valores.

El modelo volumétrico de efectos fijos (AIC= -752,083; BIC= -740,9) presentó varianzas heterogéneas y falta de normalidad de los residuos. La incorporación de la componente aleatoria mediante el

modelado de las varianzas con la función `varIdent()` y agrupamiento según rodal mejoraron el ajuste ($AIC = -844,66$; $BIC = -825,09$) y permitieron corregir los supuestos de distribución normal y homogeneidad de varianzas de los residuos. El modelo de Schumacher-Hall de volumen individual de mejor ajuste para el híbrido GC-INTA-27 se muestra en la Ecuación 3.

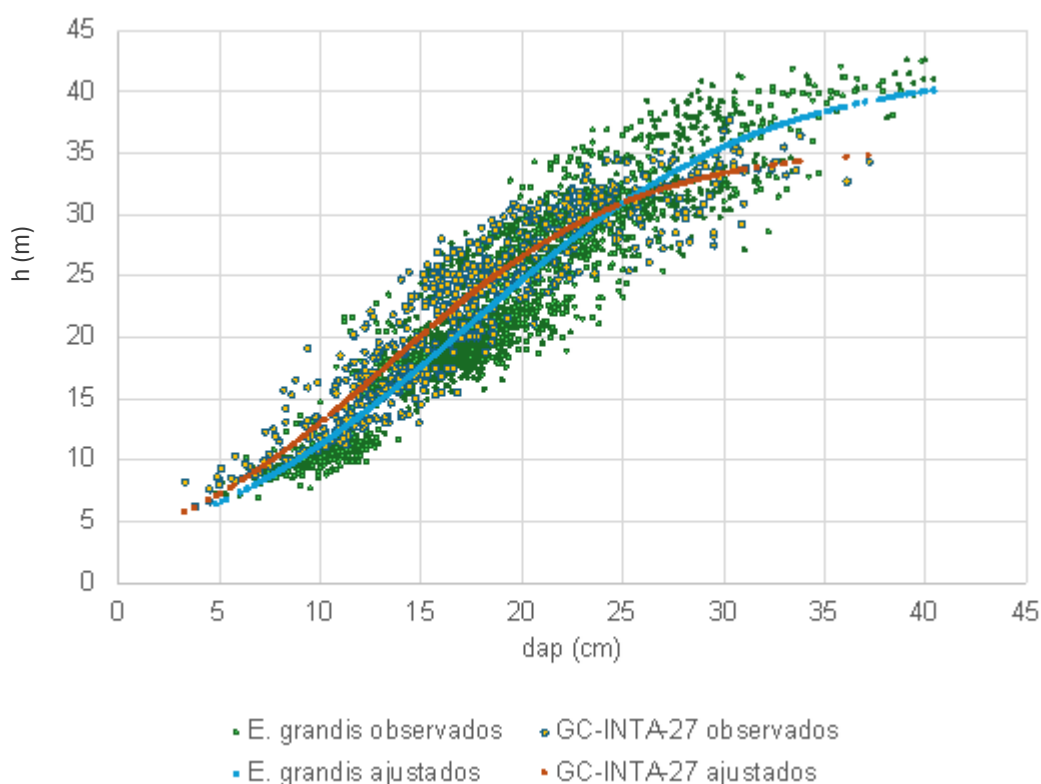


Gráfico 1. Pares dap-altura (h) observados en ensayos de 2 a 15 años en Entre Ríos y modelos hipsométricos ajustados para *E. grandis* (EG) y GC-INTA-27 (n=2778).

$$vol = 0,00003 \times dap^{1,84337} \times h^{1,152326} \quad \text{Ecuación 3,}$$

donde vol: volumen individual (m^3); dap: diámetro normal (cm); h: altura total (m).

Los estadísticos de validación de los modelos para GC-INTA-27 (Ecuación 3) y para *E. grandis* (Fassola et al., 2007) se muestran en el Cuadro 2. Si bien EM y ERM evidenciaron una capacidad predictiva aceptable en ambos modelos, el correspondiente a la especie pura presentó una mayor dispersión de los errores relativos cuando fue aplicado a los clones híbridos. Este comportamiento confirma que la relación alométrica dap-altura difiere entre ambos materiales genéticos (Gráfico 2). En particular, el 90 % de los errores relativos del modelo desarrollado para el clon híbrido fue igual o inferior al 5 %, mientras que, al aplicar el modelo de *E. grandis*, los errores alcanzaron una mayor magnitud y solo el 77 % de las observaciones presentó errores relativos iguales o inferiores a dicho umbral. Se observó un incremento en la dispersión de los errores a medida que aumenta el tamaño de los árboles; sin embargo, no se detectó una tendencia sistemática asociada con la edad.

Cuadro 2. Error medio (EM), error relativo medio (ERM), error absoluto medio (EAM) y error relativo medio de los valores absolutos (ERM_a) de los modelos para el clon híbrido GC-INTA-27 y para *E. grandis* (Fassola et al, 2007)

Modelo	EM (m^3)	ERM (%)	EAM	(ERM _a)
Para GC-INTA-27	0,0002	0,5	0,0080	2,9
Fassola et al. (2007)	-0,0068	-3,2	0,0088	3,9

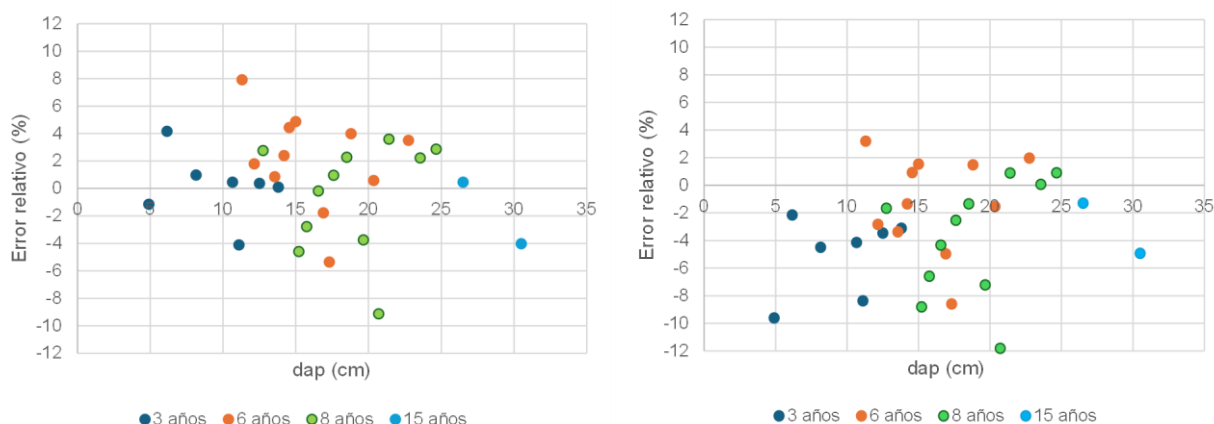


Gráfico 2. Errores relativos (%) de la muestra de validación en función del dap, diferenciados por edad. A la izquierda, modelo para GC-INTA-27; a la derecha, modelo para *E. grandis*.

El modelo específico para el clon híbrido reduce el error de las estimaciones de volumen individual, que resultan más confiables y estables que las obtenidas con el modelo para *E. grandis*. En ajustes de ecuaciones para clones híbridos de *Eucalyptus*, Gomat et al. (2011) encontraron efecto significativo del clon sobre la conicidad del fuste, indicando la importancia de calibraciones para cada especie y clon cuando se usa en estimaciones de volumen. Así mismo, Souza et al. (2018) reportan que las ecuaciones de forma y volumen deben ser específicas para los distintos materiales genéticos, puesto que ambas variables difieren entre genotipos.

4. CONCLUSIONES

Estos resultados evidencian que el modelo desarrollado para el clon GC-INTA-27 para suelos arenosos de Entre Ríos presenta un desempeño claramente superior al modelo tradicional de *E. grandis*. La menor dispersión de los errores observada indica una mayor precisión y consistencia predictiva, lo que confirma que el modelo de la especie pura no describe adecuadamente la variabilidad alométrica del clon híbrido. En este contexto, el modelo local propuesto constituye una herramienta más precisa para la estimación de existencias volumétricas del clon GC-INTA-27. No obstante, su aplicación a otros clones híbridos deberá ser previamente validada mediante estudios específicos.

5. LITERATURA CITADA

- CASANOVE, F.; BALZARINI, M.; MACCHIAVELLI, R. 2005. Aplicaciones de Modelos Mixtos en Agricultura y Forestería. Curso-Taller, 14-18 de marzo de 2005, CATIE, Turrialba, Costa Rica. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/283491085_Aplicaciones_de_Modelos_Mixtos_en_Agricultura_y_Foresteria.
- Dirección de Desarrollo Foresto Industrial. 2025. Tablero de Plantaciones Forestales. Disponible en: <https://www.magyp.gob.ar/desarrollo-foresto-industrial/tablero-plantaciones-forestales.php>
- DI RIENZO, J.A., CASANOVE, F., BALZARINI, M.G., GONZALEZ, L., TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. 2020. *InfoStat versión 2020*. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Disponible en: <http://www.infostat.com.ar>
- FASSOLA, H.; CRECHI, E.; KELLER, A.; BARTH, S; FERNANDEZ TSCHIEDER., E. 2007. Informe técnico n° 61: Funciones y Algoritmos dasométricos para manejo silvícola intensivo, de aplicación en plantaciones forestales orientadas a producción de madera de alto valor agregado" PAN 571, Región Mesopotámica. *Pinus elliotii* y *Eucalyptus grandis*, parcial para *Pinus taeda*.
- GARCÍA, M.; FLORES, M.; HARRAND, L.; MARTÍNEZ, M.; MASTRANDREA, C. 2024. Día de Campo "Manejo de rebrotes de eucaliptos". 31 de mayo de 2024, INTA Concordia, Entre Ríos (Argentina). Disponible en: https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/21440/INTA_CREntreRios_EEACConcordia_Garcia_MA_Manejo_rebrotes_eucaliptos_dia_campo.pdf?sequence=1&isAllowed=y



- GOMAT, H.; DELEPORTE, P.; MOUKINI, R.; MIALOUNGUILA, G.; OGNOUABI, N.; SAYA, A.; VIGNERON, P.; SAINT-ANDRE, L. 2011. What factors influence the stem taper of Eucalyptus: growth, environmental conditions, or genetics? *Annals of Forest Science*, 2011, 68 (1), pp.109-120. {10.1007/s13595-011-0012-3}. {hal-00930689}
- HARRAND, L. 2005. La utilización de híbridos interespecíficos como alternativa forestal. *IDIA XXI. Año V. N°8*: 171-174.
- KELLER, A. 2024. FUNCIONES DE ALTURA, VOLUMEN Y FORMA PARA Pino híbrido F2 CULTIVADO EN LA ZONA NOROESTE DE MISIONES, ARGENTINA. XXXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, 2024. Disponible en: https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2024/post_Keller-volumen-pino-hibrido.pdf
- SCOLFORO, H. F.; MCTAGUE, J.P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; CARNEIRO, R.L.; STAPE, J.L. 2019. Generalized stem taper and tree volume equations applied to eucalyptus of varying genetics in Brazil. *Canadian Journal of Forest Research*, 49(5), 447-462. Disponible en: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0276>
- SOUZA, G.S.A.D.; COSENZA, D.N.; ARAÚJO, A.C.D.S.C.; PIMENTA, L.V.A.; SOUZA, R.B.; ALMEIDA, F.M.; LEITE, H.G. 2018. Evaluation of non-linear taper equations for predicting the diameter of eucalyptus trees. *Revista Árvore*, 42. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000100002>



MODELOS COMPATIBLES DE PERFIL DE FUSTE – VOLUMEN TOTAL PARA CLONES DE *Populus* EN RODALES DE ALTA DENSIDAD

Andrés HIRIGOYEN¹; Ezequiel FERNÁNDEZ TSCHIEDER²; Gastón SAÑUDO³; Juan M. CELLINI⁴; Fabio ACHINELLI⁵

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema compatible de ecuaciones de perfil de fuste y volumen total con corteza para rodales de alta densidad (970–1421 ind.ha⁻¹) de *Populus* spp. en la Pampa arenosa y el Delta del Paraná. Se evaluó y ajustó el modelo segmentado de Max y Burkhart (1976) sobre 79 árboles (1699 secciones) mediante estimación de máxima verosimilitud con información completa (FIML), comparando un abordaje global frente a modelos clonales individuales para *P. deltoides* ('Australiano 129-60', '564-53 INTA', 'Stoneville 66') y *P. x canadensis* 'Triplo'. El sistema mostró una excelente bondad de ajuste global ($R_{aj}^2 \geq 0,980$), pero el análisis clonal reveló diferencias significativas en la geometría del fuste ($F = 164,42$; $p < 0,0001$). Los clones '564-53 INTA' ($ff = 0,424$) y 'Stoneville 66' ($ff = 0,423$) presentaron los fustes más cilíndricos, mientras que 'Australiano 129-60' ($ff = 0,399$) exhibió la mayor conicidad. Los modelos clonales individuales redujeron el sesgo y el error ($RECM \leq 0,607$ cm en diámetro; $RECM \leq 0,018$ m³ en volumen), evidenciando diferencias estadísticamente significativas en los parámetros que regulan la forma basal e intermedia del fuste (a_2 y b_4). Se concluye que es indispensable emplear los modelos compatibles individuales por clon para optimizar la precisión en la estimación de existencias y la planificación del aprovechamiento en inventarios operativos.

Palabras clave: Australiano 129-60, 564-53, Stoneville 66, Triplo, ahusamiento

1. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones de álamo (*Populus* spp.) de alta densidad de Argentina se localizan principalmente en el Delta del Paraná y en el este de la pampa húmeda. El sistema silvícola predominante en estos rodales es monocíclico, sin podas ni raleos, aunque hay productores que realizan dichos tratamientos para incrementar la producción de madera aserrable y libre de nudos. La gestión operativa de estas plantaciones requiere de la determinación precisa del volumen de madera con corteza. Para la región, se han publicado ecuaciones de volumen total y de perfil de fuste, pero muchas quedaron desactualizadas por recambios clonales. Otro inconveniente de estos estudios es que se refieren a sistemas no compatibles, lo cual genera inconsistencias cuando la suma de los volúmenes de las secciones obtenida mediante el perfil de fuste no coincide con el volumen total estimado por la función principal. Para las plantaciones de *Populus* spp. de alta densidad de Argentina, disponer de un sistema compatible permitiría al productor evaluar distintos escenarios, y eventualmente cambiar de objetivo productivo durante la rotación. En función de lo expuesto, este trabajo tiene por objetivos: 1- ajustar sistemas de ecuaciones compatibles de perfil de fuste y volumen total con corteza para las plantaciones de alta densidad de *Populus* de Argentina, y 2- comparar el desempeño de estos sistemas cuando modelan las variables de un conjunto de clones respecto del modelado para cada clon en forma individual.

¹ INIA - Las Brujas -Sistema Forestal Uruguay

² INTA EEA Delta del Paraná; Curso de Silvicultura, FCAyF UNLP.

³ Curso de Aprovechamiento Forestal, FCAyF UNLP.

⁴ Curso de Biometría Forestal, FCAyF UNLP.

⁵ Curso de Silvicultura, FCAyF UNLP; Profesional de Apoyo CIC, Buenos Aires; fachinel@gmail.com; cel.: 221 5 225 578



2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios de estudio

Los árboles utilizados en este trabajo provienen de rodales de alta densidad, implantados con entre 970 y 1421 ind.ha⁻¹ al comienzo de la rotación, y manejados sin podas de realce ni raleos. Se realizaron muestreos destructivos en el Delta del Paraná (4^o Sección de Islas, Partido de Campana, Buenos Aires), y en la Pampa arenosa (Partido de Alberti, Buenos Aires; Departamento de General López, Santa Fe).

Muestreo de ejemplares y obtención de datos en campo

La muestra completa estuvo conformada por 79 árboles pertenecientes a cuatro clones comerciales de *Populus spp.* (Cuadro 1). En campo, se registraron las siguientes variables dendrométricas por ejemplar: diámetro a la altura del pecho (D; cm), altura total (H; m) y diámetros con corteza (d_i; cm) a distintas alturas del fuste (h_i; m), correspondientes a: tocón (altura variable), 1,3 m, y posteriormente a intervalos regulares de 1,0 m hasta alcanzar la altura total. Los volúmenes parciales y totales del fuste con corteza utilizados para el ajuste del sistema se estimaron mediante la fórmula de Smalian (Prodan et al., 1997). El volumen de la sección apical se calculó asumiendo la geometría de un cono. Tras la digitalización de la información, los datos fueron auditados mediante gráficos de altura relativa (h_i/H) versus diámetro relativo (d_i/D) para detectar y depurar posibles anomalías asociadas a nudos o defectos de corteza.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de los datos de perfil de fuste y volumen con corteza de clones comerciales de *Populus spp.* en rodales de alta densidad. Las variables y sus abreviaturas son: diámetro con corteza (d_i); diámetro a la altura del pecho (D); altura total (H); volumen total del árbol con corteza (V); número de árboles (n); desviación estándar (DE); valor mínimo (mín.); valor máximo (máx.).

Clon	Región	Edad	Variable	n	Media	DE	min.	máx.
<i>P. deltoides</i> 'Australiano 129-60'	Delta del Paraná	5, 7, 9 años	D (cm)	19	15,7	2,5	11,3	20,7
			H (m)	19	18,4	2,4	14,3	22,4
			V (m ³)	19	0,150	0,060	0,062	0,272
			d _i (cm)	409	9,4	5,3	0,0	24,1
<i>P. deltoides</i> '564-53 INTA'	Pampa arenosa	7, 8, 9 años	D (cm)	20	16,4	3,8	9,4	25,3
			H (m)	20	17,1	4,5	10,6	24,7
			V (m ³)	20	0,173	0,114	0,035	0,459
			d _i (cm)	405	10,3	6,1	0,0	27,9
<i>P. deltoides</i> 'Stoneville 66'	Pampa arenosa	6, 12 años	D (cm)	25	17,3	4,9	9,0	24,4
			H (m)	25	20,2	5,8	11,3	28,5
			V (m ³)	25	0,246	0,181	0,031	0,541
			d _i (cm)	593	11,3	6,8	0,0	31,4
<i>P. x canadensis</i> 'Tripló'	Pampa arenosa	8, 9 años	D (cm)	15	16,2	2,4	10,7	21,0
			H (m)	15	16,0	1,6	12,5	18,1
			V (m ³)	15	0,139	0,049	0,052	0,247
			d _i (cm)	292	9,6	5,6	0,0	24,2
Muestra completa			D (cm)	79	16,5	3,7	9,0	25,3
			H (m)	79	18,2	4,4	10,6	28,5
			V (m ³)	79	0,18	0,128	0,031	0,541
			d _i (cm)	1699	10,3	6,1	0,0	31,4

Ajuste de sistemas compatibles

Se ajustó el modelo de Max y Burkhardt (1976) con dos abordajes: para la muestra completa (modelo global), y para los datos de cada uno de los clones en forma individual. El sistema de Max y Burkhardt (1976) está determinado por las dos expresiones que se muestran a continuación:

$$d_i = \sqrt{D^2 \cdot (b_1 \cdot (x_i - 1) + b_2 \cdot (x_i^2 - 1) + b_3(a_1 - x_i)^2 \cdot L_1 + b_4(a_2 - x_i)^2 \cdot L_2)}$$

$$V = D^2 \cdot H \cdot k \cdot \left(\frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{3} - (b_1 + b_2) + \frac{b_3}{3} \cdot a_1^3 + \frac{b_4}{3} \cdot a_2^3 \right)$$



Donde:

d_i : Diámetro con corteza medido a la altura h_i (cm); D : Diámetro a la altura del pecho (cm); V : Volumen total acumulado del fuste con corteza (m^3); H : Altura total del árbol (m); h_i : Altura a la sección de medición i (m); x_i : Altura relativa de la sección, definida como la relación (h_i/H); $L_1 = 1$, si $x_i \leq a_1$, de lo contrario 0; $L_2 = 1$, si $x_i \leq a_2$, de lo contrario 0; b_1 , b_2 , b_3 , b_4 son los parámetros de forma de los segmentos, y a_1 , a_2 representan las alturas relativas de unión de dichos segmentos; k : $\pi/40.000$.

Procedimiento estadístico y evaluación

El ajuste simultáneo de las ecuaciones se realizó mediante la técnica de máxima verosimilitud con información completa (FIML), empleando el algoritmo de mínimos cuadrados generalizados no lineales a través de la función `gnls()` del paquete `nlme` en R (R Core Team, 2020). Se aplicaron correcciones para heterocedasticidad y autocorrelación longitudinal de las mediciones (Hirigoyen et al., 2021). La bondad de ajuste se evaluó mediante gráficos de residuos estandarizados, la raíz del error cuadrático medio (RECM), el sesgo (S) y el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{aj.}$). Para comparar la forma de fuste entre clones, se calcularon los factores de forma de Pressler (ff ; Prodan et al., 1997) y se contrastaron mediante ANAVA y test de Tukey (HSD, $\alpha = 0,05$). Finalmente, se compararon los estimadores de los parámetros y sus intervalos de confianza (95%) entre el modelo global y los modelos individuales.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Factor de forma (ff)

El análisis de ANAVA arrojó diferencias significativas en el factor de forma entre los distintos clones ($F(3, 1695) = 164,42$; $p < 0,0001$). La comparación múltiple de medias de Tukey (HSD) permitió desglosar el comportamiento de la siguiente manera:

- Clones 564-53 ($ff = 0,424$) y Stoneville 66 ($ff = 0,423$): muestran los fustes más cilíndricos. La prueba de Tukey confirma que no existen diferencias significativas entre ambos ($p = 0,5662$), comportándose geométricamente en forma muy similar.
- Clon Triplo ($ff = 0,405$): con un comportamiento intermedio, pero con diferencias significativas respecto a los demás clones ($p < 0,001$).
- Clon Australiano 129-60 ($ff = 0,399$): posee el menor factor de forma, siendo por tanto el clon con el fuste más cónico, y con mayor pérdida de diámetro relativa hacia la copa de los analizados en este trabajo.

Ajuste de sistemas compatibles

El modelo global ajustado sobre la muestra completa presentó indicadores de bondad de ajuste aceptables (Cuadro 2). Sin embargo, el abordaje basado en modelos individuales por clon superó al modelo global en la totalidad de los casos, logrando menores valores de raíz del error cuadrático medio (RECM) y sesgo (S), así como coeficientes de determinación ajustados más elevados ($R^2_{aj.}$ de 0,977 a 0,997) tanto para la estimación de diámetros (d_i) como de volumen total (V).

Al comparar los parámetros estimados entre ambos abordajes (Cuadro 3 y Figura 1), se observa que los parámetros a_2 (altura relativa de unión del primer segmento basal) y b_4 (parámetro de forma del segmento inferior) del modelo global difieren estadísticamente de los estimadores individuales en la mayoría de los clones.



Cuadro 2. Estadísticos de bondad de ajuste del modelo diamétrico (d_i ; cm) y de volumen total (V ; m³) de Max y Burkhart (1976) obtenidos para la muestra completa (modelo global) y para los cuatro clones de *Populus* en plantaciones de alta densidad de Argentina. Se incluyen el criterio de información de Akaike (AIC), el Sesgo (S) y el coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{aj.}$)

Grupo	Variable	AIC	RECM	S	$R^2_{aj.}$
Muestra completa	d_i	-8676	0,549	-0,074	0,980
Muestra completa	V	-8676	0,011	-0,001	0,990
564-53	d_i	-1850	0,607	-0,017	0,987
564-53	V	-1850	0,018	-0,005	0,977
Stoneville 66	d_i	-3256	0,470	-0,017	0,994
Stoneville 66	V	-3256	0,010	0,000	0,997
Triplo	d_i	-1831	0,461	-0,005	0,991
Triplo	V	-1831	0,006	0,000	0,986
Australiano 129-60	d_i	-2640	0,409	-0,073	0,992
Australiano 129-60	V	-2640	0,007	-0,002	0,987

Cuadro 3. Parámetros del modelo de Max y Burkhart (1976), con sus errores estándar aproximados, estadístico y valor de p estimados para el modelo global (4 clones) y los modelos clonales individuales.

Grupo	Parámetros	Estimado	Error Estándar	Estadístico	Valor p
Global (muestra completa)	b_1	-3,12	0,37	-8,38	< 0,000
	b_2	1,52	0,20	7,62	< 0,000
	b_3	-0,70	0,19	-3,60	< 0,000
	b_4	189,37	30,18	6,28	< 0,000
	a_1	0,85	0,03	29,76	< 0,000
	a_2	0,05	0,00	14,66	< 0,000
564-53	b_1	-2,53	0,17	-14,86	< 0,000
	b_2	1,20	0,10	12,57	< 0,000
	b_3	-0,60	0,09	-6,29	< 0,000
	b_4	29,10	3,70	7,87	< 0,000
	a_1	0,70	0,06	12,56	< 0,000
	a_2	0,13	0,01	16,00	< 0,000
Stoneville 66	b_1	-3,18	0,26	-12,01	< 0,000
	b_2	1,55	0,14	10,83	< 0,000
	b_3	-0,80	0,14	-5,86	< 0,000
	b_4	156,69	30,08	5,21	< 0,000
	a_1	0,81	0,03	29,90	< 0,000
	a_2	0,05	0,00	12,63	< 0,000
Triplo	b_1	-3,06	0,52	-5,84	< 0,000
	b_2	1,50	0,28	5,34	< 0,000
	b_3	-0,80	0,27	-3,02	< 0,000
	b_4	10,48	1,19	8,79	< 0,000
	a_1	0,83	0,05	18,06	< 0,000
	a_2	0,20	0,01	18,28	< 0,000
Australiano 129-60	b_1	-3,41	0,60	-5,70	< 0,000
	b_2	1,68	0,32	5,20	< 0,000
	b_3	-1,15	0,31	-3,75	< 0,000
	b_4	12,50	1,05	11,95	< 0,000
	a_1	0,83	0,03	24,11	< 0,000
	a_2	0,20	0,01	24,74	< 0,000

El análisis visual de los intervalos de confianza del 95% (Figura 1) evidencia una separación nítida en los parámetros a_2 y, muy especialmente, en b_4 . Esta divergencia se acentúa en los clones 'Australiano 129-60', 'Triplo' y '564-53 INTA', los cuales presentan errores estándar acotados. Biológicamente, el parámetro b_4 regula la curvatura neiloide en la neiloidal basal, mientras que a_2 define el punto de transición hacia el segmento parabólico del fuste. Por lo tanto, la marcada variación en b_4 confirma que la geometría de la base del árbol difiere fuertemente entre clones, justificando plenamente el abandono del modelo global en favor de modelos clonales individuales para los inventarios operativos.



En el corto plazo está previsto continuar con el muestreo destructivo de ejemplares, con énfasis en la incorporación de árboles de 12 años (edad del turno de corta). Esto permitirá mejorar la representación clonal en las distintas edades y tamaños de individuo.

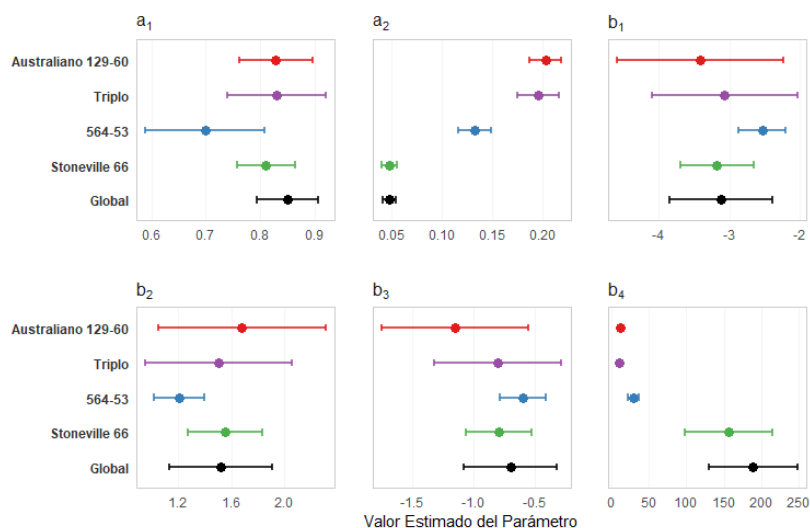


Figura 1. Gráficos comparativos de los valores de los parámetros (a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , b_3 y b_4) del modelo de Max y Burkhardt (1976) y sus intervalos de confianza (IC; 95%) para los modelos global y clonales individuales.

4. CONCLUSIONES

La parametrización del sistema compatible de Max y Burkhardt (1976) permitió modelar simultáneamente el perfil de fuste (ahusamiento) y el volumen total con corteza para rodales de alta densidad de *Populus* spp. en la Pampa arenosa y el Delta del Paraná. Aunque el modelo global mostró un ajuste estadísticamente aceptable, las marcadas diferencias en el factor de forma entre clones (con un gradiente de cilíndrica decreciente desde '564-53 INTA' y 'Stoneville 66' hacia 'Triplo' y 'Australiano 129-60') determinaron que los parámetros del sistema, en especial aquellos que regulan la geometría del fuste basal e intermedio (a_2 y b_4), difieran significativamente entre materiales genéticos. El empleo de modelos compatibles individuales por clon redujo sensiblemente el sesgo y el error cuadrático medio en las estimaciones. Por lo tanto, se recomienda prescindir del modelo global y aplicar las ecuaciones específicas por clon para optimizar la precisión en los inventarios forestales y la planificación del aprovechamiento. Si bien consideramos que los parámetros obtenidos resultan operativos, la ampliación muestral prevista permitirá recalibrar el sistema, actualizando el vector de coeficientes estructurales y los estadísticos de precisión. Estimamos que este proceso mejorará la eficiencia predictiva y la potencia explicativa de las ecuaciones. Asimismo, la formulación matemática de estos sistemas permite su rápida transferencia y adopción por parte de los productores mediante su simple implementación en planillas de cálculo (Excel) o aplicaciones móviles.

5. AGRADECIMIENTOS

A la empresa Papel Prensa S.A.I.C.F. y M. por la colaboración prestada.

6. LITERATURA CITADA

- HIRIGOYEN, A., NAVARRO-CERRILLO, R., BAGNARA, M., FRANCO, J., RESQUIN, F. & RACHID-CASNATI, C. 2021. Modelling taper and stem volume considering stand density in *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunni*. iForest - Biogeosciences and Forestry, 14(2): 127-136.
- MAX, T.; BURKHART, H.E. 1976. Segmented polynomial regression applied to taper equations. Forest Science 22: 283-289.
- PRODAN M., PETERS R., COX F., REAL P. 1997. Mensura Forestal. GTZ/IICA, Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible, San José, Costa Rica. pp. 561.
- R CORE TEAM. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.



CARACTERIZACIÓN DE ROLLOS Y TABLAS DE TRES CLONES HÍBRIDOS PRECOMERCIALES DE EUCALIPTOS

Matías S. MARTINEZ¹, Ciro A. MASTRANDREA¹, Leonel HARRAND¹, Carla S. SALTO¹,
G.P. Javier OBERSCHELP¹

RESUMEN

El aprovechamiento de las especies de eucaliptos y sus clones está limitado por tensiones de crecimiento que provocan rajaduras y desperdicios. El objetivo del trabajo fue evaluar el rajado en rollos y tablas de tres clones híbridos de *E. grandis* x *E. camaldulensis* (GC-INTA-111, GC-INTA-135 y GC-INTA-82), y sus variaciones según la posición del rollo y su impacto en el rendimiento de madera comercial. Se utilizaron materiales de 12 años procedentes de un ensayo clonal de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) INTA Concordia. Se determinó el índice de rajado en rollos (IRr) y el rajado en tablas medido en cada extremo. El análisis se efectuó mediante modelos lineales mixtos generalizados con distribuciones log-normal y beta. El clon GC-INTA-82 registró el mayor IRr (5,46) y un descarte del 56 %. El saneado fue desfavorable en clones con bajo IRr, mientras que la presencia de médula no influyó en el volumen descartado.

Palabras clave: *Tensiones de crecimiento, rendimiento de madera, variabilidad clonal, tablas aserradas.*

1. INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento industrial de *Eucalyptus* spp. y sus clones está limitado por tensiones de crecimiento (Richter, 2015), afectando el rendimiento de volumen de tablas comerciales (Soares et al., 2024). Su baja estabilidad dimensional, susceptibilidad a defectos de secado y deficientes propiedades mecánicas reducen la aptitud de este material para aserrado estructural (Derikvand et al., 2018a; Ananías et al., 2014), provocando mermas de rendimiento de hasta un tercio (Trugilho et al., 2006). La correlación de rajado entre rollizos y tablas exhibe resultados contrastantes (Martínez et al., 2021; Hernández et al., 2014).

El factor de conversión, de tabla comercial obtenido, en *Eucalyptus* spp. decrece entre 4% y 35% por rajado en la cabeza de las tablas (Martínez et al., 2023; López et al., 2016). La inclusión de médula devalúa la calidad estética y estructural del aserrado (Yang et al., 2002), defecto mitigable mediante mayores diámetros y sistemas de corte alternativos (Brennan et al., 1992). Al respecto, López et al. (2018) reportaron mayores pérdidas por rajado asociadas a la médula. Este estudio evaluó el -rajado en rollizos y tablas de tres clones híbridos de *E. grandis* x *E. camaldulensis* (GC-INTA-111, GC-INTA-135 y GC-INTA-82), analizando su variación según la posición longitudinal en el fuste y su impacto sobre el rendimiento comercial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se evaluaron tres clones de *E. grandis* x *E. camaldulensis* (GC-INTA-111, GC-INTA-135 y GC-INTA-82) de 12 años (INTA Concordia Entre Ríos; 31°18'49" S, 58°18'01" O; 4 m x 2,25 m). Se seleccionaron dos individuos por clon, se apearon y trozaron en rollizos de 3,2 m. A las 0 horas, mediante registros fotográficos de las caras extremas de los rollizos y con QGIS 3.10, se determinó el índice de rajado (IRr) según Lima (2000).

¹ INTA, EEA Concordia, Entre Ríos, Argentina. *Contacto: martinez.matias@inta.gob.ar



$$\text{Índice de Rajado rollo (IRr)} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{S} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde A_i representa el área de la rajadura i (de 1 a n) y S es la sección transversal de la cara del rollizo.

Se realizó el aserrado de los rollizos, mediante el diagrama de aserrado convencional de la región. El despiece primario se ejecutó en una sierra sin fin de carro (primeros dos cortes), seguido por una sierra sin fin reaserradora ("panera") para conformar el prisma central mediante dos cortes adicionales. Finalmente, la conversión en tablas se llevó a cabo en una sierra sin fin (tableadora). Las dimensiones fueron de 3,2 m de longitud por 2,7 cm de espesor (1 pulgada), con ancho variable. Se midió el rajado de los extremos de las tablas aserradas a la salida de la sierra. Se calculó el volumen obtenido de tablas y su factor de conversión. El volumen de descarte consistió en la estimación del "saneado" de los extremos de la tabla por la presencia de rajaduras, en fracciones de 30 cm (1 pie) según la longitud de rajado.

Para el análisis estadístico se utilizó modelos lineales mixtos generalizados, el IRr se modeló mediante distribución log-normal (Bates et al., 2015) y el volumen de descarte vía distribución beta (Kosmidis & Zeileis, 2025). En el ANOVA, los factores genotipo (MG), posición (ROLLO) y médula fueron efectos fijos; el árbol se anidó como efecto aleatorio. Las medias se compararon con la prueba de Tukey ($p=0,05$).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los diámetros de los rollos rondaron los 25 a 32 cm en punta fina para R1, y 24 a 30 cm para la R2.

Efecto del IRr por material genético y tipo de rollo: en el Cuadro 1, el GC-INTA-82 presenta valores entre 8 y 10 veces más que los registros de GC-INTA-111 y GC-INTA-135, respectivamente. La mayor variabilidad se presenta en GC-INTA-111 con un coeficiente de variación de 61 %.

Cuadro 1. Resumen estadístico de índice de rajado en rollos (IRr), media (Promedio) y coeficiente de varianza (C.V.).

Clon	N° rollos	Promedio*	C.V. (%)
GC INTA 111	7	0,55 (a)	60,83
GC INTA 135	8	0,64 (a)	21,79
GC INTA 82	8	5,46 (b)	44,79

*Letras diferentes, significa estadísticamente diferencia significativa ($p<0.001$). Comparación de medias por test de Tukey.

Existe una diferencia significativa en el promedio del IRr del GC-INTA-82 con respecto a los demás materiales genéticos. GC-INTA-111 y GC-INTA-135 se comportaron de manera similar para la variable evaluada. Martínez et al. (2021) reportaron valores de IRr de 0,23 y 0,95 en clones híbridos de 15 años, GC-INTA-24 y GC-INTA-27 respectivamente; este último conocido en el sector forestal como propenso al rajado. Asimismo, López et al. (2018) registraron un valor de IRr de 2,24 en GC-INTA-6 de 14 años. Ambos antecedentes presentan magnitudes menores a las halladas para GC-INTA-82 en el presente trabajo. Los resultados muestran que el clon GC-INTA-82 presenta una alta susceptibilidad al rajado. Este factor eleva significativamente las pérdidas de material, limitando su potencial para la producción de madera aserrada comercial.

En el Cuadro 2, se detalla el IRr por tipo de rollo basal (R1) y rollo siguiente (R2). Los clones GC-INTA-111 y GC-INTA-135 mostraron valores promedios superiores en R2; en contraste, GC-INTA-82 exhibió un comportamiento inverso. Los coeficientes de variación (C.V.) más elevados se presentaron en el rollo basal (R1).

Cuadro 2. Resumen estadístico de índice de rajado en rollos (IRr), media (Promedio), coeficiente de varianza (C.V.), valores mínimos (Mín) y valores máximos (Máx).

Material Genético	Tipo Rollo	Media IRr*	C.V. (%)	Mín.	Máx.
GC- INTA-111	R1	0,38 (a)	61,58	0,14	0,60
	R2	0,79 (b)	43,38	0,50	1,17
GC-INTA-135	R1	0,62 (a)	28,23	0,46	0,78
	R2	0,66 (a)	17,84	0,48	0,73
GC-INTA-82	R1	6,19 (a)	55,10	3,23	9,96
	R2	4,74 (a)	20,34	3,47	5,81

*Letras diferentes, significa estadísticamente diferencia significativa ($p<0.05$). Comparación de medias por test de Tukey.



Existen diferencias significativas en el promedio del IRr, con respecto al tipo de rollo, únicamente para el clon GC-INTA-111. Este comportamiento es similar al descrito por Martínez et al. (2021) en GC-INTA-27, de 15 años, a las 72 horas del apeo.

Proporción de volumen de tablas descartado por rajado respecto al volumen total de tablas: la proporción de descarte corresponde al volumen perdido por rajaduras respecto al total del volumen de cada pieza aserrada. Este cálculo considera un saneado cada 1' aplicado según la longitud del rajado presente en los extremos de la tabla aserrada. En el Cuadro 3, se observa diferencia entre el clon GC-INTA-82 con respecto a los otros, su porcentaje de descarte es aproximadamente 4 veces a los otros dos clones. En estudios similares con clones híbridos, López et al. (2018) registraron una pérdida máxima del 35 % a los 14 años, mientras que Martínez et al. (2023) reportaron pérdida del 30 % en clones híbridos de 15 años.

Cuadro 3. Promedio de proporción de descarte (Media), desvío estándar (D.E.).

Materiales genéticos	n° rollos	Media	D.E.
GC INTA 111	4	14,3 %	2,1 %
GC INTA 135	4	16,0 %	5,9 %
GC INTA 82	4	56,0 %	13,0 %

En el Gráfico 1, se observa que los materiales genéticos presentan diferencias significativas ($p < 0,01$), al igual que los tipos de rollos, en la variable proporción de volumen de descarte por rajado.

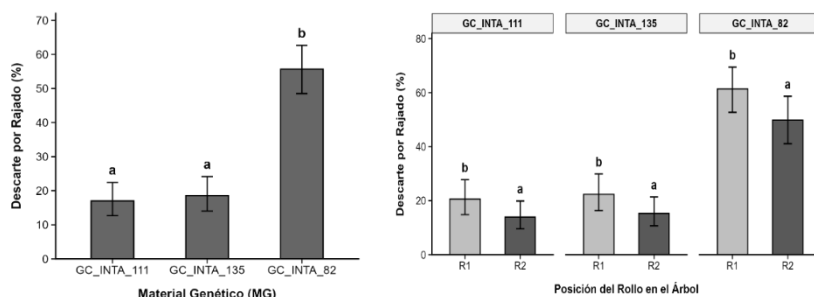


Gráfico 1. Porcentaje de volumen de descarte por presencia de rajado en tablas aserrada según materiales genéticos (A) y por tipo de rollo (B). Letras diferentes, significa estadísticamente diferencia significativa ($p < 0,01$). Comparación de medias por Test de Tukey. Las barras indican el error estándar.

Respecto al tipo de rollo, existen diferencias estadísticas que muestran menores proporciones de descarte por rajado en los rollos R2 en todos los casos. Esto podría deberse a que el rollo R1 soporta mayores tensiones, por su ubicación en el fuste que tolera movimientos de manera menos elástica. En los trabajos de Martínez et al. (2022) y López et al. (2018), las proporciones de descarte reportadas fueron menores; sin embargo, en dichos ensayos, el saneado se estimó según la longitud de sus respectivas rajaduras y no en múltiplos de saneado cada 1', que es el sistema habitualmente utilizado por los aserraderos de la región.

Al clasificar las tablas aserradas según la presencia de médula, no se observaron diferencias significativas en la proporción de volumen descartado por rajaduras entre los materiales evaluados (Gráfico 2).

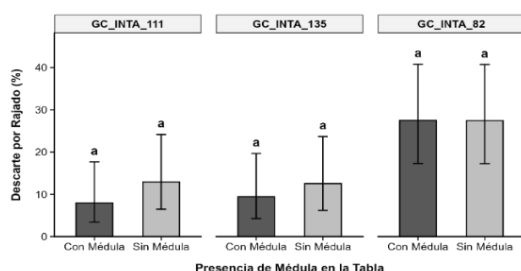


Gráfico 2. Proporción de descarte por rajado para distintos materiales genéticos según la presencia o ausencia de médula en las tablas aserradas. Letras distintas, significa estadísticamente diferencia significativa ($p < 0,01$). Comparación de medias por test de Tukey. Las barras indican el error estándar.



En el Cuadro 4 se observa que el clon GC-INTA-135 registró la máxima proporción de tablas con médula (32 %), esto se podría dar por su menor cantidad de tablas obtenidas y o por una medula más oscilante en el rollo. A pesar de que estos resultados no muestran una asociación directa entre el descarte por rajado y la presencia de médula, es necesario tener presente que las tablas con médula suelen presentar otros problemas de descarte como fisuras longitudinales y deformaciones, no considerados en este trabajo.

Cuadro 4. Cantidad y porcentaje de tablas aserradas con y sin presencia de médula en tres clones híbridos precomerciales de *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis*.

Material genético	N° de tablas sin médula	N° de tablas con médula	% de tablas con médula
GC-INTA-111	30	7	19
GC-INTA-135	21	10	32
GC-INTA-82	29	12	29

Correlación de IRr con proporción de descarte por rajado en tablas aserradas.

En el Gráfico 3 se presenta la relación entre el IRr y la proporción de volumen perdido por saneado de rajaduras en las tablas aserradas del conjunto de los materiales genéticos. Los resultados demuestran que un incremento en el IRr produce una mayor pérdida de madera aserrada.

Balasso et al. (2022) han mostrado que la cantidad de madera aserrada comercial está influenciada principalmente por el volumen y la conicidad de los rollizos, más que por otras características de los rollizos. Por otro lado, el sistema de aserrado influye en la aparición de rajaduras en las tablas; se obtuvo mayor presencia de rajado en tablas de *E. grandis* provenientes de aserrados tangenciales (Rocha & Tomaselli, 2002). En estudios con *E. nitens*, el porcentaje de rajaduras en los extremos en las tablas estaba ligeramente influenciado por las rajaduras en los troncos (Balasso et al., 2022).

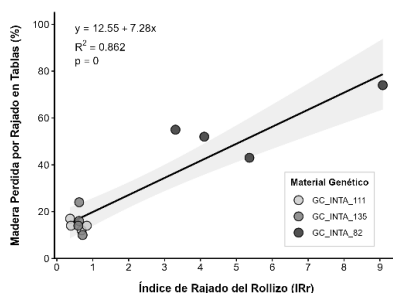


Gráfico 3. Correlación de IRr con proporción de madera descartada por rajado en tablas aserradas.

Los resultados de este trabajo son un avance parcial de un estudio que involucra un total de 12 clones. El tener una base más amplia de materiales genéticos permitirá observar mejor la asociación entre las características evaluadas.

4. CONCLUSIONES

Los valores elevados del índice de rajado en rollos (IRr) se asocian con una reducción en el rendimiento de volumen de tablas aserradas comercial.

El clon híbrido GC-INTA-82 registró los mayores valores de IRr y los mayores volúmenes de descarte en las tablas aserradas, con 5,46 y 56 %, respectivamente. Consecuentemente, estos resultados cuantitativos respaldan la decisión de no inscribir este material como comercial y retirarlo del programa de mejoramiento genético de INTA.

En materiales con bajo IRr, el saneado por pies provoca una pérdida de volumen comercial excesiva al descartar piezas que presentan rajaduras pequeñas.

La presencia de médula en las tablas aserradas no influyó en la generación de mayores proporciones de volumen descartado por rajaduras.



5. LITERATURA CITADA

- ANANÍAS, R.A.; SEPÚLVEDA-VILLARROEL, V.; PÉREZ-PEÑA, N.; LEANDRO-ZUÑIGA, L.; SALVO-SEPÚLVEDA, L.; SALINAS-LIRA, C.; CLOUTIER, A.; ELUSTONDO, D.M. 2014. Collapse of *Eucalyptus nitens* wood after drying depending on the radial location within the stem. *Drying Technol* 32(14):1699–1705
- BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. 2015. Fitting linear mixed effects models using lme4. *J Stat Softw* 67(1):1–48
- BRENNAN, G.K.; HANKS, W.R.; WARD, S.L. 1992. Processing plantation-grown Tasmanian blue gum. Department of Conservation and Land Management. WURC Technical Report No. 41, 14.
- DERIKVAND, M.; KOTLAREWSKI, N.; LEE, M.; JIAO, H.; CHAN, A.; NOLAN, G. 2018a. Visual stress grading of fibre-managed plantation Eucalypt timber for structural building applications. *Constr Build Mater* 167:688–699. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.090>
- HERNÁNDEZ, M.; ZADERENKO, C.; MONTEOLIVA, S. 2014. Estrés de crecimiento y propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus dunnii* en Argentina. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(3), 373-384. Repositorio institucional – UNLP.
- KOSMIDIS, I.; ZEILEIS, A. 2025. Regresión beta de soporte extendido para respuestas [0, 1]. *Journal of the Royal Statistical Society C*. doi:10.1093/jrssc/qlaf039
- LIMA, I.L.; GARCIA, J.N.; NOGUEIRA, M.C.S. 2000. Influência do desbaste nas tensões de crescimento de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden growth stress. *Scientia Forestalis*, (58):111-125. ISSN 2318-1222 (online)
- LÓPEZ, J.; BORRALHO, N.; LÓPEZ, A.; MARCÓ, M.; HARRAND, L. 2016. Variación genética del índice de rajado de rollizos en *Eucalyptus dunnii* Maiden. *Ciencia e Investigación Forestal (INFOR)*, 22(2): 23-34.
- LÓPEZ, J.A.; MASTRANDREA, C.A.; LÓPEZ, J.A.; HERNÁNDEZ, M.A.; MARTÍNEZ, M.S.; OBERSCHHELP, G.P.J.; HARRAND, L. 2018. Tensiones de crecimiento, propiedades físicas, mecánicas y defectos en tablas de clones puros e híbridos de *Eucalyptus grandis* del INTA. XXXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. [Repositorio INTA] <http://hdl.handle.net/20.500.12123/13905>
- MARTÍNEZ, M.S.; MASTRANDREA, C.A.; WINCK, R.A.; HARRAND, L.; OBERSCHHELP, G.P.J. 2023. Relación de promedio de rajado en tablas con respecto a las características de los rollos en clones de eucalipto. *Actas del VIII Congreso Forestal latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino*. 647-649.
- MARTÍNEZ, M.S.; WINCK, R.A.; MASTRANDREA, C.A.; HARRAND, L.; OBERSCHHELP, G.P.J. 2022. Defectos en tablas aserradas de clones de eucaliptos de INTA. XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos.
- MARTÍNEZ, M.S.; MASTRANDREA, C.A.; WINCK, R.A.; HARRAND, L.; OBERSCHHELP, G.P.J. 2021. Evaluación del rajado en rollizos de clones puros e híbridos de *E. grandis*. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. [Repositorio INTA] <http://hdl.handle.net/20.500.12123/13896>
- RICHTER, C. 2015. *Wood characteristics*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07422-1>
- Secretaría de Planificación del Desarrollo y la Competitividad Federal. Subsecretaría de Planificación Federal y Proyectos Prioritarios. 2023. Forestal, papel y muebles. *Informes de Cadenas de Valor*, Año 8, N° 68, ISSN 2525-0221.
- SOARES, L.C.; DA, S.; MOREIRA, J.C.; BOTEAGA, G.P.; CARNEIRO, V.Q.; LAFETÁ, B.O.; DE FIGUEIREDO, I.C.R.; GONÇALVES, F.M.A. 2024. Phenotyping methodologies of log end splitting in eucalyptus (*Eucalyptus* spp.). *Plant Breeding* 1-11. <https://doi.org/10.1111/pbr.13177>
- TRUGILHO, P.F.; LIMA, J.T.; ANDRADE DE PÁDUA, F.; CARVALHO SORAGI, L.; ANDRADE, C.R. 2006. Deformação a longo prazo em rael (DRL) e tangencial (DRT) em seis clones de *Eucalyptus* spp. *Cerne*, 12(3), 279-286.
- YANG, J. L.; FIFE, D.; WAUGH, G.; DOWNES, G.; BLACKWELL, P. 2002. The effect of growth strain and other defects on the sawn timber quality of 10-year-old *Eucalyptus globulus* Labill, *Australian Forestry*, 65:1, 31-37, DOI: 10.1080/00049158.2002.10674850.



VARIACIÓN AXIAL DEL ÍNDICE DE RAJADO EN CLONES DE *Eucalyptus grandis*

Augusto J. LÓPEZ¹, Cesar G. TORRES¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la variación axial del índice de rajado (IRr) en 12 clones de *Eucalyptus grandis*. Se realizaron 1.037 determinaciones de IRr correspondientes a 519 rollizos, analizadas mediante modelos aditivos generalizados mixtos (GAMM). El modelo explicó el 84,4 % de la variación en el IRr y evidenció diferencias significativas entre clones y a lo largo del fuste. El IRr alcanzó su máxima magnitud alrededor del 20 % de la altura relativa y disminuyó progresivamente hacia posiciones superiores del fuste. Los patrones de variación axial difirieron entre clones y amplían el conocimiento disponible sobre este carácter en materiales clonales de *E. grandis*.

Palabras clave: *tensiones de crecimiento, materiales clonales, rajado de rollizos, modelos aditivos generalizados mixtos*

1. INTRODUCCIÓN

Las tensiones de crecimiento constituyen una de las principales limitantes para el aprovechamiento de madera sólida en especies del género *Eucalyptus*. La presencia de elevados niveles de estas tensiones ha sido ampliamente documentada, observándose una importante variabilidad tanto entre especies como entre individuos de una misma especie (Yang y Waugh, 2001; Lima, 2005; Beltrame et al., 2015; López et al., 2016, entre otros). Este fenómeno reduce el rendimiento del aserrado y limita la obtención de productos sólidos de calidad (Yang and Waugh, 2001; Okuyama et al., 2004).

Debido a la dificultad de determinar directamente las tensiones de crecimiento, su evaluación suele abordarse mediante indicadores indirectos (Yang y Waugh, 2001). Entre ellos, el rajado de los rollizos constituye uno de los indicadores más utilizados, debido a su estrecha relación con la liberación de las tensiones de crecimiento durante el procesamiento de la madera.

Diversos estudios han evaluado el rajado en especies y cultivares del género *Eucalyptus* (Okuyama et al., 2004; López y López, 2013; Martínez, 2022), enfocándose principalmente en los rollizos basales. En contraste, la distribución axial del rajado ha recibido menor atención, pese a sus posibles implicancias para el aprovechamiento industrial. Este aspecto adquiere particular interés en materiales clonales, dado que el rajado presenta una importante componente genética, con heredabilidades moderadas a altas reportadas para distintos materiales de *Eucalyptus* (Schacht et al., 1998; Santos, 2002; López et al., 2016), lo que justifica evaluar si estos patrones de variación se mantienen entre árboles de un mismo clon y difieren entre materiales genéticos.

Conocer la variación axial del rajado constituye un aspecto relevante para comprender cómo se distribuyen las manifestaciones asociadas a las tensiones de crecimiento a lo largo del fuste, aportando información valiosa para el aprovechamiento industrial de materiales clonales de *Eucalyptus*. Por ello, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la variación axial del índice de rajado en clones de *E. grandis*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

a. Material genético, sitio de estudio y evaluación

Se evaluaron 12 clones experimentales de *Eucalyptus grandis*. Los materiales se encontraban establecidos en un ensayo de 14 años ubicado en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) INTA Bella Vista, Corrientes (28°27'4,30" S; 58°59'34,32" O). El ensayo fue implantado bajo un diseño completamente aleatorizado, con un número variable de repeticiones por clon (2 a 4). Cada repetición

¹ Grupo Forestal EEA INTA Bella Vista, e-mail: lopez.javier@inta.gob.ar



correspondió a una parcela de nueve árboles dispuestos en un arreglo cuadrado, con espaciamiento inicial de 3 m × 3 m.

Se seleccionaron seis árboles por clon (entre uno y cuatro rametos por parcela), procurando evitar ejemplares con competencia asimétrica evidente que pudiera modificar la expresión de las tensiones de crecimiento. Los árboles fueron apeados con motosierra y, a partir de 1,30 m de altura, se obtuvieron entre cuatro y diez rollizos consecutivos de 2,40 m de longitud, dependiendo de la altura total de cada árbol. Las principales características dendrométricas de los materiales evaluados se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Variables dendrométricas promedio de los materiales clonales muestreados.

Clon	DAP (cm)	HT (m)	Diámetro con corteza	
			Máximo (cm)	Punta fina (cm)
C1	23,96 (1,33)	29,67 (1,32)	28,70 (1,91)	13,48 (0,83)
C18	22,77 (2,08)	28,80 (1,21)	26,88 (2,43)	12,85 (1,63)
C2	24,92 (2,35)	28,57 (1,72)	30,60 (3,23)	12,73 (1,71)
C22	22,33 (2,35)	27,33 (2,10)	29,55 (4,02)	11,90 (1,04)
C24	26,10 (2,25)	31,93 (1,16)	32,32 (4,69)	13,83 (1,58)
C27	25,81 (2,32)	30,57 (1,34)	30,98 (2,61)	14,17 (1,09)
C30	26,92 (2,24)	30,60 (0,89)	32,50 (3,17)	14,08 (0,92)
C33	16,46 (1,54)	19,68 (2,21)	19,65 (1,68)	11,65 (0,79)
C36	23,83 (2,38)	29,92 (1,42)	27,83 (3,22)	12,38 (0,48)
C37	17,55 (1,89)	23,70 (1,19)	20,50 (3,41)	11,35 (1,17)
C41	19,58 (2,63)	26,07 (2,16)	23,80 (3,13)	11,77 (0,73)
CB	23,96 (2,03)	29,05 (0,89)	29,33 (3,14)	14,38 (2,11)

Los valores entre paréntesis corresponden a los desvíos estándar.

El índice de rajado en rollizos (IRr) se determinó a partir de imágenes digitales tomadas 72 h después del apeo, siguiendo la metodología descrita por López y López (2013). Se utilizó el índice propuesto por Lima (2000, citado por Santos, 2002), definido como el porcentaje del área ocupada por las rajaduras respecto del área total de la sección transversal del rollizo.

Se realizaron 1.037 determinaciones de IRr correspondientes a 519 rollizos. Para cada sección del fuste, el IRr se calculó como el promedio de las mediciones obtenidas en las caras opuestas de dos rollizos consecutivos. Posteriormente, la ubicación de cada sección se expresó como altura relativa (% de la altura total del árbol), para permitir la comparación de los patrones de variación axial entre árboles de diferente tamaño.

b. Análisis de datos

La variación del índice de rajado (IRr) en función de la altura relativa del fuste se analizó mediante Modelos Aditivos Generalizados Mixtos (GAMM), asumiendo una distribución Gamma con función de enlace logarítmica, debido a la naturaleza positiva y asimétrica del IRr, la heterogeneidad de varianzas y la necesidad de modelar relaciones no lineales a lo largo del fuste.

La especificación del predictor lineal aditivo fue:

$$\log(\mu_{ijk}) = \alpha + f_i(hr_{ijk}) + b_j$$

Donde μ_{ijk} es el valor esperado del índice de rajado para la k-ésima medición en el j-ésimo rameto del i-ésimo clon, α representa el intercepto global, $f_i(\cdot)$ la función suave específica para cada clon, hr la altura relativa y $b_j \sim N(0, \sigma_b^2)$ el efecto aleatorio asociado al árbol individual (rameto). Este término permite considerar la dependencia entre observaciones obtenidas a distintas alturas dentro de un mismo rameto.

La contribución relativa del efecto de clon y de los rametos a la capacidad explicativa del modelo se evaluó a partir del incremento de la desviación explicada al incorporar sucesivamente cada componente al modelo.



Los parámetros del modelo y el nivel de suavizado se estimaron mediante máxima verosimilitud restringida (REML), utilizando funciones del paquete mgcv del software R (Wood, 2017). La adecuación del modelo se evaluó mediante análisis gráfico de residuos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados indicaron que el índice de rajado (IRr) varió significativamente tanto con la posición en el fuste como entre los clones evaluados (Cuadro 2). El modelo explicó el 84,4 % de la variación observada del IRr, evidenciando una elevada capacidad para describir su comportamiento. Entre los componentes del modelo, el efecto del clon representó la principal fuente de variación explicada (46 %), mientras que la variación entre rametos de un mismo clon también mostró una contribución relevante (9 %).

El IRr presentó patrones de variación longitudinal diferenciados entre los clones evaluados, con diferencias tanto en la magnitud como en la forma de la respuesta. La interacción entre la altura relativa y el clon fue altamente significativa ($F = 60,65$; $edf = 50,70$; $p < 0,001$), y el elevado número de grados de libertad efectivos indicó una relación compleja y no lineal entre ambas variables, que no puede describirse adecuadamente mediante una tendencia lineal simple.

Se observó variabilidad entre rametos pertenecientes a un mismo clon. El efecto aleatorio asociado al árbol individual (rameto) resultó significativo ($F = 3,17$; $edf = 47,88$; $p < 0,001$), por lo que fue necesario considerar esta fuente de variación en el modelo para evitar atribuir al efecto clonal diferencias propias de los rametos individuales.

Cuadro 2. Resumen del análisis de varianza (ANOVA) para los términos suavizados del modelo aditivo generalizado (GAMM) ajustado.

Denominación	Término	edf	Ref.df	F	p
Interacción suavizada clon × altura relativa	$f_i(hr_{ijk})$	50,70	95	60,65	< 0,001
Efecto aleatorio del árbol individual	b_j	47,88	71	3,17	< 0,001
Desviación explicada por el modelo					84,4 %

edf: grados de libertad efectivos; Ref.df: grados de libertad de referencia; F: estadístico; p: probabilidad asociada.

La curva general estimada por el modelo (Gráfico 1) mostró un incremento inicial del índice de rajado (IRr) hasta aproximadamente el 20 % de la altura relativa, seguido por una disminución progresiva y una estabilización en valores bajos a partir del 60 % de la altura. Estos resultados indican que la magnitud del rajado no se distribuye uniformemente a lo largo del fuste, concentrándose en mayor medida en los sectores inferiores del árbol.

El patrón axial observado en el presente estudio coincide con el descrito por López y Parisi (2002) para *Eucalyptus grandis*. Mediante la evaluación del rajado en discos, estos autores observaron un incremento del rajado hasta alcanzar un máximo en la porción inferior del fuste y una posterior disminución hacia la copa. Una tendencia similar también fue observada por Lima et al. (2002) y Trevisan et al. (2013) para *E. grandis*, quienes observaron un incremento del rajado desde la base del fuste hasta posiciones intermedias y una posterior disminución hacia las secciones superiores de los árboles. Del mismo modo, Naghizadeh y Wessels (2021) reportaron una mayor incidencia del rajado en las posiciones basales de árboles de *E. grandis* × *E. urophylla*. Asimismo, Omonte y Valenzuela (2015) observaron en *E. nitens* un aumento de las tensiones de crecimiento longitudinales hasta aproximadamente un tercio de la altura del árbol, seguido de una disminución hacia posiciones superiores, mostrando una variación axial consistente con el patrón observado en el presente estudio.

Si bien la curva general permitió describir la tendencia promedio de los clones evaluados, el análisis por clon reveló que dicho patrón no fue uniforme entre los materiales evaluados (Gráfico 2). Aunque todos los materiales presentan un comportamiento compatible con la tendencia general, se observan diferencias tanto en la magnitud de los valores esperados como en la ubicación y amplitud de los máximos relativos. Además, los clones con mayores niveles de rajado tendieron a presentar una mayor dispersión de los valores de IRr observados.

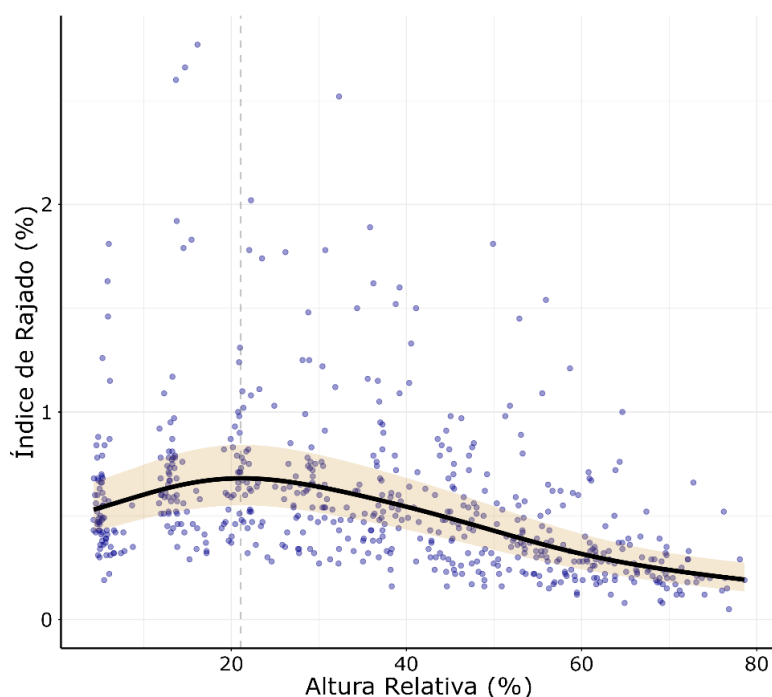


Gráfico 1. Curva general estimada del índice de rajado (IRr) en función de la altura relativa del fuste. La banda sombreada corresponde al intervalo de confianza del 95 % de la respuesta media estimada y la línea vertical punteada señala la posición del máximo predicho por el modelo.

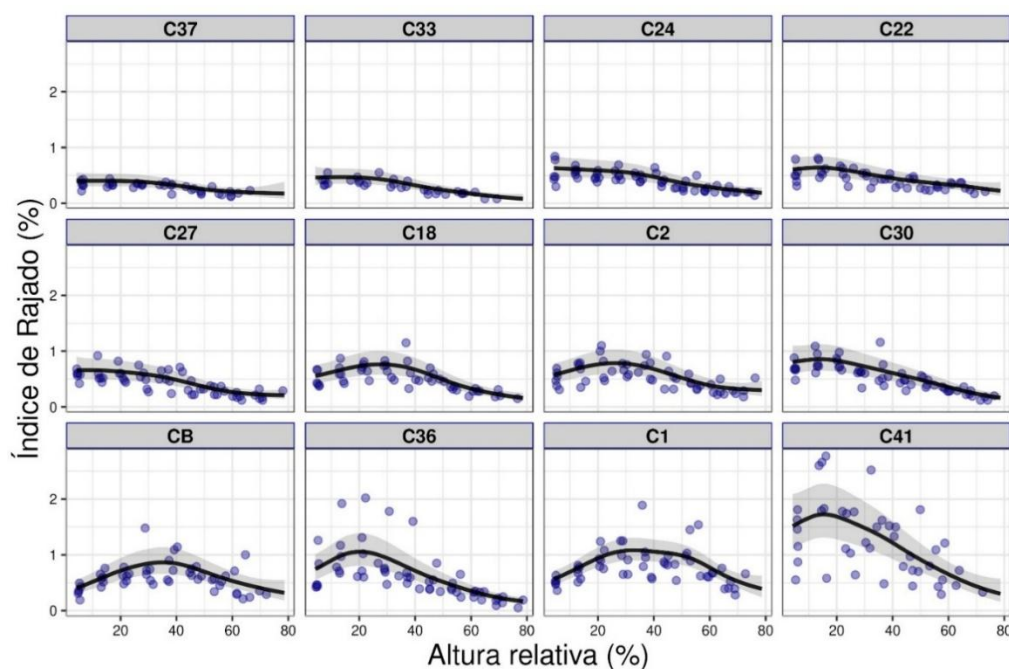


Gráfico 2. Patrones de variación axial del índice de rajado (IRr) por clon. La banda sombreada corresponde al intervalo de confianza del 95 % de las curvas estimadas.

Los clones mostraron un gradiente de respuesta al rajado, desde materiales con valores persistentemente bajos a lo largo del fuste (C37, C33, C24, C22), otros con niveles intermedios (C27, C18, C2, C30, CB) y un grupo con elevada susceptibilidad al rajado (C36, C1, C41). Asimismo, algunos clones presentaron máximos pronunciados en posiciones basales o intermedias, mientras que en otros las diferencias a lo largo del fuste fueron menos marcadas.

La variabilidad observada entre clones coincide con antecedentes que reportan diferencias entre materiales clonales para características asociadas al rajado (Schacht et al., 1998; Lopez et al., 2016),



aunque la información sobre la distribución axial de dichas características en distintos genotipos continúa siendo escasa. La magnitud del rajado constituye un fenómeno complejo, potencialmente influenciado por múltiples características del árbol y de la madera (Schacht et al., 1998; Lima, 2005; Gril et al., 2017). En este sentido, la incorporación de variables complementarias podría contribuir a comprender mejor los patrones observados y mejorar la capacidad predictiva de los modelos. En conjunto, los resultados muestran que la variación axial del rajado no constituye un patrón uniforme entre los clones evaluados, evidenciando diferencias tanto en la magnitud del rajado como en su distribución a lo largo del fuste. Estos hallazgos amplían el conocimiento disponible sobre este carácter en materiales clonales de *Eucalyptus grandis*.

4. LITERATURA CITADA

- BELTRAME, R.; PERES, M. L.; LAZAROTTO, M.; GATTO, D.A.; SCHNEID, E.; HASELEIN, C.R. 2015. Tensão de crescimento e sua relação com as rachaduras de topo em toras de *Eucalyptus* spp. *Scientia Forestalis* 43(105): 63–74.
- GRIL, J.; JULLIEN, D.; BARDET, S.; YAMAMOTO, H. 2017. Tree growth stress and related problems. *Journal of Wood Science* 63: 411–432.
- LIMA, I. L.; GARCIA, J. N.; PIEDADE, S. M. de S. 2002. Rachaduras de extremidades de tora e suas implicações nas rachaduras da madeira serrada. *Scientia Forestalis* 61: 13–24.
- LIMA, I.L. 2005. Influência do desbaste e da adubação na qualidade da madeira serrada de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil. 157 p.
- LÓPEZ, J.A.; PARISI, L. 2002. Tensiones de crecimiento del estrato dominante de algunos orígenes y procedencias de *Eucalyptus grandis* a los 17 años de edad en 2 sitios del oeste de la provincia de Corrientes, Argentina. *XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos*. Concordia, Entre Ríos, Argentina. 10 p.
- LÓPEZ, J.A.; LÓPEZ, A.J. 2013. Coeficiente de repetibilidad edad-edad de las tensiones de crecimiento en clones de *Eucalyptus grandis*. *4.º Congreso Argentino y Latinoamericano de Ciencias Forestales*. Iguazú, Argentina, 23–27 de septiembre de 2013. 13 p.
- LÓPEZ, J.A.; HARRAND, L.; MARCÓ, M.A.; LÓPEZ, A.J. 2016. Variación genética en clones híbridos de *Eucalyptus*. *Quebracho* 24(1-2): 5-17.
- MARTÍNEZ, M.S. 2022. Caracterización tecnológica de clones de Eucalipto. Tesis (Maestría). Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones, Eldorado, Misiones, Argentina. 118 p.
- NAGHIZADEH, Z.; WESSELS, C.B. 2021. The effect of water availability on growth strain in *Eucalyptus grandis* × *urophylla* trees. *Forest Ecology and Management* 483: 118926.
- OKUYAMA, T.; DOLDÁN, J.; YAMAMOTO, H.; ONA, T. 2004. Heart splitting at crosscutting of eucalypt logs. *Journal of Wood Science* 50(1): 1–6.
- OMONTE, M.; VALENZUELA, L. 2015. Tensiones de crecimiento longitudinales de árboles de *Eucalyptus nitens* con dimensiones aserrables. *Maderas. Ciencia y Tecnología* 17(3): 673–684.
- R Core Team. 2026. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- SANTOS, P. E. T. 2002. Avaliação de características tecnológicas de madeira para serraria em progênies de polinização aberta de eucalipto e implicações para o melhoramento genético. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil. 153 p.
- SCHACHT, L.; GARCIA, J. N.; VENCOVSKY, R. 1998. Variação genética de indicadores de tensão de crescimento em clones de *Eucalyptus urophylla*. *Scientia Forestalis* 54: 55-68.
- TREVISAN, R.; DENARDI, L.; CARDOSO, G.V.; HASELEIN, C. R.; SANTINI, E. J. 2013. Variação axial do índice de rachaduras na base e no topo de toras de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Scientia Forestalis* 41(97): 75–81.
- WOOD, S. N. 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. 2nd ed. Chapman and Hall/CRC, Boca Raton, FL.
- YANG, J.-L.; WAUGH, G. 2001. Growth stress, its measurement and effects. *Australian Forestry* 64(2): 127–135.



EVALUACIÓN DE LA RIGIDEZ MECÁNICA EN VIGAS Y EN PROBETAS ESTANDARIZADAS DE MADERA DE PINO HÍBRIDO

Rosa A. WINCK^{1,2*}, María Elena GAUCHAT¹, María Cristina AREA³, Pabla Yolanda GENES⁴, Diego Rolando AQUINO¹.

RESUMEN

Este estudio analiza la importancia del módulo de elasticidad (MOE) de la madera en la construcción y evalúa la eficiencia de técnicas acústicas no destructivas frente a ensayos estáticos con máquina universal. Para ello, se evaluaron con diferentes métodos 274 vigas de escuadrías comerciales provenientes de 15 familias de pino híbrido y 45 probetas libres de defectos. No se encontraron diferencias estadísticas ($p > 0,05$) entre familias analizadas para los módulos determinados con las diferentes técnicas. Los valores medios de módulo de elasticidad fueron de 98.398 kg/cm², 89.933 kg/cm², 87.334 kg/cm², 72.678 kg/cm² y 67.199 kg/cm², obtenidos para vigas con máquina universal, *Tree Sonic*, probetas con máquina universal, *Lumber Grade* y *Metriguard*, respectivamente. Las técnicas acústicas resultaron eficientes para determinar el módulo de elasticidad estático de las vigas (piezas enteras) y de las probetas estandarizadas. Sin embargo, se advierte que el valor del módulo de elasticidad puede verse subestimado dependiendo del equipamiento utilizado, destacando que el método de vibración transversal arrojó los valores más bajos. Los valores de MOE estáticos para piezas enteras y en probetas fueron muy similares.

Palabras clave: *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Propiedades mecánicas, Técnicas acústicas, Métodos Destructivos.**

1. INTRODUCCIÓN

El uso de la madera como material de construcción ha aumentado en los últimos años, impulsado por las exigencias de sostenibilidad bioeconómica, la reducción de la huella de carbono y el desarrollo de sistemas constructivos industrializados. En la región del Noreste Argentino (NEA), las plantaciones forestales del género *Pinus* constituyen la principal fuente de abastecimiento industrial de madera de coníferas. Tradicionalmente dominada por especies puras como *Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* Engelm, la matriz foresto-industrial de las provincias de Misiones y Corrientes fue incorporando paulatinamente el pino híbrido (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, de primera y segunda generación (F₁ y F₂). Este taxón combina características deseables como el crecimiento, la rectitud de fuste y la forma de las copas (Belaber et al., 2018). Para consolidar la integración de este recurso en usos estructurales de alto valor agregado, como tirantes comerciales, vigas laminadas encoladas y estructuras portantes, la caracterización de sus propiedades mecánicas resulta indispensable. Entre ellas, la rigidez de la madera, cuantificada a través del módulo de elasticidad (MOE), representa uno de los parámetros fundamentales que condiciona el desempeño estructural (Fank et al., 2017; Fank, 2018). En el diseño de estructuras de madera, el MOE determina los estados límites de servicio (deformaciones y flechas máximas admisibles) y se encuentra íntimamente correlacionado con la resistencia o módulo de rotura (MOR) y la densidad de la madera (Winck et al., 2021, 2022). La evaluación de la rigidez en piezas estructurales de madera puede obtenerse con distintas técnicas, el módulo de elasticidad dinámico (MOEd) mediante métodos basados en la respuesta acústica y el módulo de elasticidad estático (MOEe), obtenido a través de ensayos de flexión en vigas de dimensiones comerciales (França et al., 2019). Asimismo, la vinculación de estos parámetros con los

¹ INTA, EEA Montecarlo, Misiones, Argentina. *Contacto: winck.rosa@inta.gob.ar

² IMAM, UNaM, FCF, Laboratorio de Tecnología de la Madera, Eldorado, Misiones, Argentina.

³ IMAM, UNaM, CONICET, FCEQyN, Programa de Celulosa y Papel (PROCYP), Posadas, Misiones, Argentina.

⁴ INTA, EEA Bella Vista, Corrientes, Misiones, Argentina.



resultados obtenidos en probetas libres de nudos permite dimensionar la influencia de los defectos de la madera aserrada sobre su eficiencia mecánica. La implementación de métodos no destructivos (MND) mediante tecnologías acústicas aplicadas en vigas permite estimar de manera precisa y no invasiva el MOE, constituyendo una ventaja frente a los métodos tradicionales destructivos en máquina universal. Esto facilita la clasificación estructural bajo normativas vigentes (IRAM 9670-3, 2025) y optimiza la segregación de piezas para su utilización en la industria de la construcción. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la relación entre el módulo de elasticidad dinámico y estáticos en vigas y en probetas libres de defectos, para verificar la efectividad de estas metodologías en la determinación de la aptitud estructural en la madera de pino híbrido F₁ INTA-PINDO de 11 años.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material utilizado corresponde a pino híbrido F₁ *Pinus elliotii* var. *elliotii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PEE x PCH). Se tomaron árboles de 15 familias pertenecientes al ranking de crecimiento inferior, medio y superior, provenientes de dos ensayos de progenies de pino híbrido F₁ INTA-PINDO ubicados a los 26° 33' latitud S y 54° 40' longitud O (sitio 1) y a los 26° 09' latitud S y 54° 26' longitud O (sitio 2). A los 11 años se apearon 90 árboles, 45 de cada sitio. De las trozas de 3,15 m de longitud (obtenidas a partir de 1,30 m de altura desde el suelo), se lograron 274 piezas (vigas de 3"x3" y 3"x5" y tablas de 1" de espesor y de ancho variable). Una vez secadas en cámara, de cada pieza se registraron sus dimensiones y el contenido de humedad (CH) con un xilohigrómetro digital marca Marrari modelo M51. Se excluyeron las piezas con presencia de médula y con resina, debido a que estos factores interfieren con las ondas acústicas (Fank et al., 2017). Posteriormente se determinó el módulo dinámico con 3 técnicas acústicas; por vibración transversal (MOE_v) con el equipo Metriguard® E-Computer Modelo 340, por impacto con *Tree Sonic* (MOE_i), y por resonancia con el Software *Lumber Grade* (MOE_r) de Fakopp® y el módulo de elasticidad estático de piezas enteras (MOE_e PE) con máquina electromecánica universal de ensayos marca DIDACTA® modelo 10407030, de procedencia Italiana, con capacidad de 300 kN y una sensibilidad de 300N, y siguiendo el procedimiento indicado en la norma IRAM 9663 (2013). Paralelamente, se tomaron, 3 probetas por familias, libres de defectos con dimensiones de 2 x 2 x 36 cm (45 probetas en total) y se enviaron a la EEA de Bella Vista de INTA Corrientes para determinar el módulo de elasticidad (MOE_e Pr) con Máquina Universal de Ensayo CIFIC 5 toneladas y empleando la norma DIN 52186 (1978).

Análisis estadísticos

El análisis de los datos se realizó con el *software* InfoStat® (Di Rienzo et al., 2020). Se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) para verificar la existencia de diferencias significativas en los valores de módulo de elasticidad entre familias. Para determinar el grado de asociación entre los módulos dinámicos y estáticos de piezas enteras y probetas se realizó un análisis de correlación de *Pearson*. Se empleó un nivel de significancia del 5 %.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza indicó que no existieron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre familias para los MOE_v, MOE_i, MOE_r, MOE_e PE y MOE_e Pr. Los valores medios de módulo de elasticidad fueron de 98.398 kg/cm², 89.933 kg/cm², 87.334 kg/cm², 72.678 kg/cm² y 67.199 kg/cm², obtenidos para vigas con máquina universal, *Tree Sonic*, probetas con máquina universal, *Lumber Grade* y Metriguard, respectivamente (Cuadro 1 y Gráfico 1). Este comportamiento se mantuvo para todas las familias. La familia 05 (F29) del ranking superior de crecimiento, en general, presentó la tendencia de mayores valores de MOE con todos los métodos de evaluación. Las diferentes técnicas arrojaron valores consistentes entre ellas, para todas las familias analizadas. Los valores de MOE_e para vigas fueron mayores que los MOE_d, coincidente con lo indicado por Ramos et al., 2026 y Winck et al., 2026. Sin embargo, Quagliotti et al., (2019) en un estudio de vigas de *Pinus elliotii*, comparando MOE_e y MOE_d obtenido con el *Tree Sonic* de Fakopp (impacto), este último arrojó mayores valores de MOE. También Winck et al (2025), evaluando 7 taxones de *Pinus* de 23 años por el método de



resonancia y vibración transversal determinó menores valores de módulo dinámico para este último, coincidiendo con lo hallado en este estudio.

En el Cuadro 1 se presenta los valores medios por familia de módulo de elasticidad obtenidos con los diferentes métodos de evaluación para las vigas (274 piezas) y para las probetas libres de defectos (45 muestras). El menor valor de desvío estándar se obtuvo para el método acústico de resonancia, mientras que la mayor variación fue para el MOEe de las probetas estandarizadas (Cuadro 1), esto se debe probablemente al tamaño de la muestra, dado que al tratarse de probetas pequeñas y libre de defectos se esperaría una mayor homogeneidad en el leño y menor variación en el valor de MOEe.

Cuadro 1. Valores medios por familia de módulo de elasticidad para 15 familias de pino híbrido F₁ INTA-Pindo de 11 años.

Ranking de Crecimiento	Código Familias	Familias	Métodos No Destructivos			Métodos Destructivos	
			Módulo de elasticidad dinámico (kg/cm ²)			Módulo de elasticidad estático (kg/cm ²)	
			MOEv PE	MOEi PE	MOEr PE	MOEe PE	MOEe Pr
			n = 274	n = 274	n = 274	n = 274	n = 45
Superior	01	F19	67.884	100.080	71.643	100.040	83.747
	02	F51	68.459	86.668	69.244	96.946	92.405
	03	F20	75.070	97.477	79.415	110.496	96.055
	04	F28	78.064	94.886	76.929	108.769	83.686
	05	F29	72.083	99.947	73.988	106.609	109.243
Medio	06	F49	70.777	91.275	71.921	102.942	95.709
	07	F4	70.257	89.490	71.125	102.536	79.329
	08	F5	54.295	74.749	57.105	86.031	86.872
	09	F13	55.981	76.456	71.488	80.876	76.869
	10	F33	62.608	85.040	69.100	95.453	79.072
Inferior	11	F11	65.226	89.319	73.845	96.205	78.343
	12	F23	72.130	97.907	84.349	100.165	89.773
	13	F59	65.424	90.961	73.672	101.810	81.267
	14	F6	62.385	84.849	71.550	90.241	84.313
	15	F35	67.341	89.890	74.798	96.849	93.325
Media			67.199	89.933	72.678	98.398	87.334
Desvío Estándar			6.525	7.673	5.868	8.111	8.819

Nota: MOEv: módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal, MOEi: módulo de elasticidad dinámico por impacto, MOEr: módulo de elasticidad dinámico por resonancia, MOEe: módulo de elasticidad estático determinado con máquina universal, PE: Piezas enteras de escuadrías comerciales, Pr: probetas libres de defectos.

Estos valores son similares a lo encontrado para el F₁ en Australia. Bailleres et al. (2019), analizando muestras radiales del fuste a través de una metodología basada en ultrasonido, registró un valor medio de 98.000 kg/cm² para el pino híbrido F₁ australiano de 11 años de edad. Por otro lado, Wessels et al. (2011), en parcelas experimentales de Sudáfrica reportaron valores menores (MOEe de 40.000 kg/cm² y MOEd de 51.000 kg/cm²) para el pino híbrido F₁ de 9 y 11 años. En el presente estudio los valores de estas propiedades fueron más elevados y puede atribuirse al sitio y principalmente a la variación en edad de los materiales genéticos considerados. Es importante destacar, que el valor medio para el MOEe de las piezas de escuadrías comerciales para las familias evaluadas es cercano a lo exigido para la clase 1 (10.000 N/mm²) y superior a lo establecido para la clase 2 (8.300 N/mm²) de resistencia estructural para vigas de pinos resinosos según la norma argentina IRAM 9670-3, (2025).

En el grafico 1 se puede observar los valores medios de MOE determinados con diferentes técnicas acústicas y MOEe de piezas enteras y en probetas libres de defectos. En el grafico 2 se puede observar los valores medios de MOEe para las probetas libres de defectos y su valor correspondiente a la pieza enteras por familias (45 muestras). Los mayores valores de las piezas enteras respecto a las probetas pueden deberse a la forma de realizar en ensayo de flexión (global) con 3 puntos de apoyos, las piezas se flexionan menos, arrojando una menor flecha o deformación y por lo tanto un mayor valor de MOEe. Mientras que en ensayo sobre probetas la aplicación de la carga es puntual.

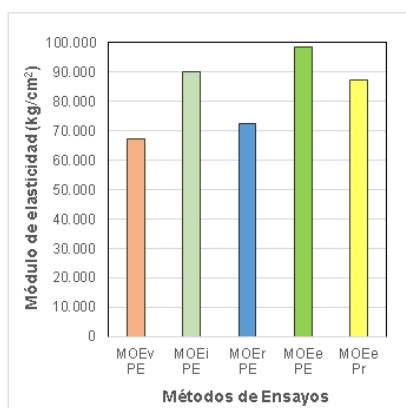


Gráfico 1. Valores medios de MOE determinados con diferentes técnicas acústicas y MOEe en piezas enteras (274 vigas) y en probetas libres de defectos (45 probetas).

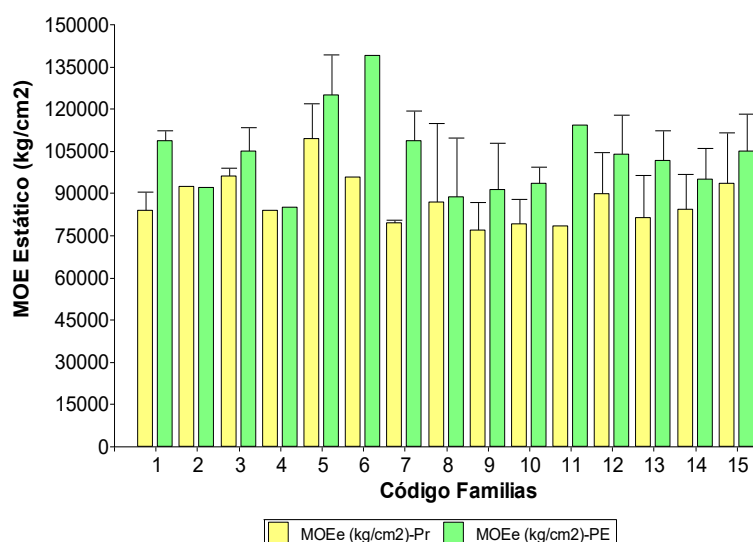


Gráfico 2. Valores medios de MOEe para las probetas libres de defectos (45 probetas) y su valor correspondiente a la pieza enteras por familias.

En el cuadro 2 se pueden apreciar el grado de correlación de *Pearson* entre módulos, y la probabilidad estadística asociada, notándose una mayor asociación entre el MOEe PE y MOEv, pero en todos casos significativas ($p < 0,05$).

Cuadro 2. Correlación de Pearson y la probabilidad para los MOE obtenidos con distintos métodos.

	MOEv	MOEi	MOEr	MOEe PE	MOEe Pr
MOEv	1	0,0000	0,0223	0,0000	0,0022
MOEi	0,80	1	0,0008	0,0000	0,0000
MOEr	0,40	0,57	1	0,0084	0,0242
MOEe PE	0,85	0,83	0,46	1	0,0030
MOEe Pr	0,52	0,67	0,40	0,51	1

Los resultados demuestran que es posible emplear las técnicas no destructivas para realizar la clasificación mecánica de las piezas. Esto también fue expresado por otros autores (França et al., 2018a; 2018b; 2019; 2020). Las evaluaciones acústicas se consolidan como una tecnología clave para la caracterización mecánica de la madera. La adopción de estos métodos de clasificación no destructiva representa un paso estratégico para potenciar la competitividad de la industria forestoindustrial del Noreste Argentino en el mercado de la construcción, permitiendo agregar valor a la producción regional, certificar la calidad del recurso y asegurar que la materia prima destinada a aplicaciones estructurales cumpla con los estándares técnicos exigidos.

4. CONCLUSIONES

La familia 05 del ranking superior de crecimiento mostró una tendencia de mayores valores de módulo de elasticidad obtenido con los diferentes métodos, sin embargo, sin diferencias significativas con las demás progenies.

La madera de pino híbrido F₁ INT-Pindó de 11 años alcanzó valores medios de módulo de elasticidad estático tanto en piezas enteras como en probetas libres de defectos que clasifican para usos estructurales para la clase 2 principalmente según las exigencias establecidas en la norma IRAM 9670-3 para vigas de pinos resinosos.

Es posible utilizar los métodos acústicos de vibración transversal, impacto y resonancia para determinar el módulo estático de la madera de pino híbrido en vigas y probetas libres de defectos.



5. LITERATURA CITADA

- BAILLERES H, LEE D, KUMAR C, PSALTIS S, HOPEWELL G, BRANCHERIAU L. 2019. Improving returns from southern pine plantations through innovative resource characterization. Vol. 61.170 p.
- BELABER, E. C., GAUCHAT, M. E., REIS, H. D., BORRALHO, N. M., CAPP, E. P. 2018. Genetic parameters for growth, stem straightness, and branch quality for *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* F₁ hybrid in Argentina. *Forest Science*, 64(6), 595-608.
- DI RIENZO J.A., CASANOVES F., BALZARINI M.G., GONZALEZ L., TABLADA M. RCW. 2020. InfoStat. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- DIN 52186:1978-06. *Prüfung von Holz; Biegeversuch*. Berlín: Deutsches Institut für Normung, 1978.
- FANK P.Y., 2018. Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliottii*) cultivado en el nordeste argentino para uso estructural. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concepción del Uruguay; 2018.
- FANK P.Y., MASTRANDREA C.A. 2017. Validación de un método acústico no destructivo para la determinación de la rigidez de tablas aserradas de pino resinoso (*Pinus elliottii* y *Pinus taeda*) cultivado en el nordeste de Argentina.
- FRANÇA F.J., SEALE R.D., ROSS R.J., SHMULSKY R., FRANÇA T.S.A. 2018b. Using transverse vibration nondestructive testing techniques to estimate stiffness and strength of southern pine lumber. Res. Paper FPL- RP-695. Madison, WI: US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 8 p., 695.
- FRANÇA F.J.N., FRANÇA T.S.F.A., SEALE R.D., SHMULSKY R. 2020. Nondestructive evaluation of 2 by 8 and 2 by 10 southern pine dimensional lumber. *Forest Products Journal*, 70(1):79-87.
- FRANÇA F.J.N., SEALE R.D., SHMULSKY R., FRANÇA T.S.F.A. 2019. Assessing southern pine 2 x 4 and 2 x 6 lumber quality: longitudinal and transverse vibration. *Wood Fiber Sci*, 51(1):1-14.
- FRANÇA T.S.F.A., FRANÇA F.J.N. SEALE R.D., SHMULSKY R. 2018a. Bending strength and stiffness of No. 2 grade southern pine lumber. *Wood Fiber Sci*. 50(2):1–15.
- IRAM 9670-3. 2025. Madera aserrada estructural. Clasificación visual de las piezas para uso estructural. Parte 3 - Piezas aserradas de pino taeda y pino elliottii (*Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* Engelm). Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM). Buenos Aires. 35 p.
- QUAGLIOTTI S., BRUZZONE G., CHÁBEN Á., BAÑO V., MOYA L. 2019. Clasificación visual de madera de *Pinus elliottii* de Uruguay y estimación del módulo de elasticidad mediante técnicas no destructivas. Visual grading of uruguayan *Pinus elliottii* and stiffness estimation by nondestructive techniques. 4 congreso Latinoamericano de Estructuras de Maderas. Pg 259-269.
- RAMOS, M.R.; FANK, P.Y.; MASTRANDREA, C.A.; MARTÍNEZ, M.S.; SOSA-ZITTO, M.A. 2026. Validación de un método acústico no destructivo para la determinación del módulo de elasticidad de vigas aserradas de pino resinoso cultivado en el Nordeste de Argentina. *Revista Yvyrareta*. Núm. 34 (2026), Suplemento de resúmenes XX Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Pp 468-482.
- WESSELS C.B., DOWSE G.P., SMIT H.C. 2011. The flexural properties of young *Pinus elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* timber from the Southern Cape and their prediction from acoustic measurements. *South For*. 73(3–4):137–147.
- WINCK R.A.; COLCOMBET L., AQUINO D.R., BULMAN C., BRAGAÑOLO A., PRIMO A.I., FASSOLA H.E. 2026. Vibración transversal y resonancia para determinar el módulo de elasticidad de tirantes de pino híbrido F₂ de 26 años. *Revista Yvyrareta*. Núm. 34 (2026), Suplemento de resúmenes XX Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Pp 501-502.
- WINCK R.A., AQUINO D.R., BELABER E.C., FASSOLA H.E., BULMAN HARTKOPF C., GOMEZ, B.J., BRAGAÑOLO A. 2025. Caracterización mecánica de 7 taxones de pino mediante técnicas acústicas. *Jornadas Forestales Entre Ríos*.
- WINCK R.A., AREA M.C., AQUINO D.R., FASSOLA H.E., KELLER A.E., BRAGAÑOLO A., GAUCHAT M.E. 2022. Módulo de elasticidad estático y dinámico en tablas de escuadrías comerciales de pino híbrido. *Jornadas XXXVI Forestales Entre Ríos*. 133-137.
- WINCK, R.A., WINCK, L.R., BELABER, E.C., AQUINO, D.R., FASSOLA, H.E., AREA, M.C., GAUCHAT, M. E. 2021. Parámetros indicadores de la calidad estructural de familias de pino híbrido F₁ INTA-PINDÓ. *Jornadas Forestales de Entre Ríos*.



PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA MADERA DE *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* Y *Corymbia torelliana*

Pabla Yolanda GENES¹; Carla Anahi GIMENEZ²; Augusto Javier LÓPEZ¹; Leticia Graciela RUIZ¹

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo caracterizar y comparar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* (CCV) y *Corymbia torelliana* (CT). Para ello, se evaluaron seis árboles de cada especie, determinándose la densidad básica, densidad aparente al 12 % de humedad, módulo de rotura (MOR), módulo de elasticidad (MOE) a la flexión estática y dureza Janka (DJ). Los resultados evidenciaron diferencias estadísticas significativas entre las dos especies evaluadas para la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas analizadas, con excepción del módulo de rotura. CCV presentó valores superiores a CT en todas las propiedades que mostraron diferencias significativas, mientras que ambas especies presentaron valores similares de MOR. Las diferencias observadas aportan información útil para la caracterización tecnológica de ambas especies y para futuros estudios de mejoramiento genético e hibridación.

Palabras clave: calidad de madera, *Corymbia*, densidad de la madera, dureza Janka, flexión estática

1. INTRODUCCIÓN

Las especies del género *Corymbia* han adquirido importancia a nivel mundial debido a su potencial para la producción de madera de calidad para usos sólidos de alto valor y a su notable adaptabilidad a diversas condiciones edafoclimáticas (Lee, 2007; López y Vera Bravo, 2018). Entre ellas, *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* se destaca por su crecimiento volumétrico y calidad de fuste, mientras que *Corymbia torelliana* presenta interés por su utilización como progenitor femenino en cruzamientos controlados destinados a la obtención de híbridos que combinen características productivas, tecnológicas y mayor tolerancia a factores bióticos y abióticos (Lee, 2007; Reis et al., 2014; Gimenez et al., 2025).

Debido al creciente interés por estas especies, resulta necesario ampliar el conocimiento sobre las propiedades físicas y mecánicas de su madera. La caracterización de estas propiedades permite predecir el comportamiento de la madera durante los procesos de transformación industrial y constituye una herramienta para definir sus posibles usos (Coronel, 1994; López, 2005). En Brasil existen antecedentes sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera de especies del género *Corymbia* (Araujo et al., 2023). En Argentina, los antecedentes disponibles son escasos y se restringen principalmente a estudios sobre la densidad de la madera juvenil de *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* (López y Vera Bravo, 2016), sin información equivalente para *C. torelliana*.

Esta falta de información adquiere especial relevancia en el contexto de los programas de mejoramiento e hibridación, donde el conocimiento de las propiedades de la madera de las especies parentales constituye un antecedente importante para la evaluación de materiales de interés. Si bien en la Mesopotamia argentina existen antecedentes que evidencian la buena adaptación y el desempeño en crecimiento de especies del género *Corymbia* (López y Vera Bravo, 2018, Gimenez et al. 2022,

¹ INTA EEA Bella Vista. genes.pabla@inta.gob.ar

² Becaria postdoctoral INTA – CONICET

Gimenez et al., 2025), la información disponible sobre las propiedades físicas y mecánicas de su madera continúa siendo limitada, particularmente para *C. torelliana*.

Con base en estos antecedentes, el objetivo del presente trabajo fue caracterizar y comparar las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* y *Corymbia torelliana*, contribuyendo al conocimiento tecnológico de estas especies y generando antecedentes de utilidad para futuros programas de mejoramiento del género *Corymbia*.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material de estudio estuvo constituido por seis árboles de *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* (CCV) de 16 años, provenientes de un ensayo ubicado en la Estación Experimental del INTA Bella Vista, Corrientes (28° 26' 43,2" S; 58° 59' 16,9" O) y seis árboles de *Corymbia torelliana* (CT) de 18 años pertenecientes a una plantación de un productor local (28° 22' 22,9" S; 58° 54' 37,3" O). El ensayo de CCV fue establecido a un espaciamiento de 3 m × 3 m, sobre un suelo arenoso profundo, bien drenado y en posición de loma, mientras que la plantación de CT presenta un espaciamiento de 6 m × 3 m y se encuentra sobre un suelo arenoso somero, en posición de bajo, susceptible al anegamiento, con presencia de un horizonte arcilloso subsuperficial próximo a la superficie.

En ambas especies se seleccionaron aleatoriamente individuos con diámetro a la altura del pecho (DAP) igual o próximo al promedio (CCV: $23,6 \pm 3,26$ cm; CT: $28,0 \pm 3,47$ cm), buena forma de fuste y adecuado estado fitosanitario. Los árboles fueron apeados y de cada uno se obtuvo una troza de un metro de longitud inmediatamente por encima de la sección correspondiente al DAP. A partir de cada troza se extrajo un tablón central de 8 cm de espesor en dirección Este-Oeste, el cual fue almacenado para su secado natural.

Una vez alcanzada la humedad de equilibrio, los tablones fueron procesados para obtener probetas libres de defectos destinadas a los diferentes ensayos, conforme a las normas correspondientes (Figura 1. a). De cada árbol se obtuvieron cuatro probetas destinadas a cada determinación. Las probetas destinadas a los ensayos mecánicos fueron acondicionadas en una cámara climatizadora a 20 °C y 65 % de humedad relativa hasta alcanzar un contenido de humedad de equilibrio del 12 % (Figura 1. b).



Figura 1. a. Probetas para ensayos mecánicos; b. Cámara climatizadora; c. Máquina de ensayos mecánicos (Ensayo de Flexión Estática)

La densidad (básica y aparente al 12 % de humedad) se determinó siguiendo las normas IRAM 9544. Los ensayos de flexión estática para determinar el MOR y MOE se realizaron de acuerdo con la norma DIN 52186, mientras que la dureza Janka tangencial (JTg) y Radial (JRd) se evaluaron según la norma IRAM 9570. Los ensayos mecánicos se efectuaron en una máquina universal de ensayos mecánicos con capacidad de 5 toneladas (Figura 1. c). Todos los ensayos, tanto físicos como mecánicos, se efectuaron en el laboratorio de calidad de madera de la Estación Experimental Agropecuaria INTA Bella Vista.

Para cada árbol, el valor de cada propiedad se obtuvo promediando los resultados de las cuatro probetas evaluadas.



Para evaluar las diferencias entre las especies en las propiedades físicas y mecánicas estudiadas, los datos se analizaron mediante un Análisis de la Varianza (ANOVA). Previo al análisis, se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene, respectivamente. Se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey, utilizando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. El procesamiento estadístico se realizó con el software R (R Core Team, 2021).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la varianza reveló diferencias estadísticas significativas entre las dos especies evaluadas para la mayoría de las propiedades físicas y mecánicas analizadas, con excepción del módulo de rotura (Gráfico 1).

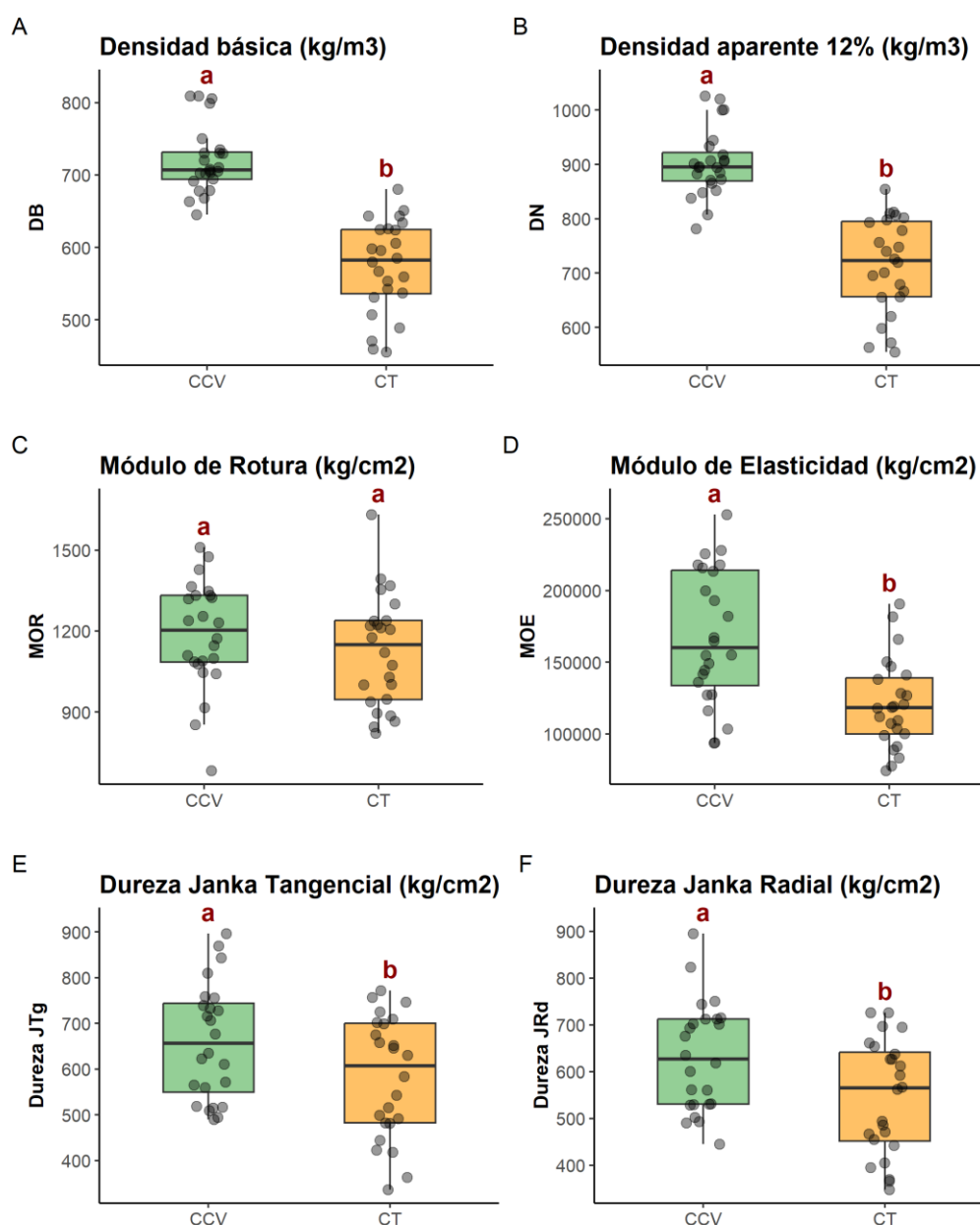


Gráfico 1. Valores medios y distribución de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* (CCV) y *Corymbia torelliana* (CT). A: densidad básica (DB); B: densidad aparente al 12 % de humedad (DN); C: módulo de rotura (MOR); D: módulo de elasticidad (MOE); E: dureza Janka tangencial (JTg); F: dureza Janka radial (JRd). Letras distintas indican diferencias significativas según Tukey ($\alpha = 0,05$).



En cuanto a las propiedades físicas, CCV presentó una densidad básica promedio de 720,0 kg/m³ y una densidad aparente al 12 % de humedad de 902,5 kg/m³, mientras que CT, registró valores de 573,6 y 712,9 kg/m³, respectivamente.

De acuerdo con la clasificación propuesta por Coronel (1994), la madera de CCV se ubica dentro del grupo de las maderas pesadas, mientras que la de CT corresponde al grupo de las maderas semipesadas. Estos resultados coinciden con los reportados por Segura (2015) para CT de 15 años, quien registró una densidad básica promedio de 597 kg/m³.

Entre las propiedades mecánicas evaluadas, el módulo de elasticidad (MOE) fue superior en CCV (167.625 kg/cm²) respecto de CT (120.675 kg/cm²), indicando una mayor rigidez de la madera en la primera especie. Resultados similares fueron reportados por Araujo et al. (2023), quienes también observaron valores superiores de MOE en CCV (~ 123.794 kg/cm²) respecto de CT (~ 72.900 kg/cm²) en árboles de seis años.

En contraste, el módulo de rotura (MOR) no presentó diferencias significativas entre especies, registrándose valores medios de 1.187 kg/cm² para CCV y 1.125 kg/cm² para CT. Si bien CT presentó una menor densidad y un menor módulo de elasticidad que CCV, ambas especies exhibieron una resistencia última a la flexión similar, lo que sugiere que otros factores, además de la densidad de la madera, podrían influir en esta propiedad.

Finalmente, la dureza Janka también fue superior en CCV. En el plano tangencial (JTg) se registraron valores de 661 y 582 kg/cm² para CCV y CT, respectivamente. La misma tendencia se observó en la sección radial (JRd), con valores medios de 632 y 545 kg/cm².

Si bien las diferencias de edad y condiciones de crecimiento de los árboles podrían haber contribuido a las diferencias observadas en las propiedades físicas y mecánicas, los resultados obtenidos muestran que CCV presentó mejores propiedades físicas y mecánicas en la mayoría de las variables evaluadas, destacándose por su mayor densidad, rigidez y dureza. No obstante, a pesar de su menor densidad y módulo de elasticidad, CT exhibió una resistencia a la flexión comparable a la de CCV y propiedades tecnológicas favorables. En conjunto, estos resultados amplían el conocimiento tecnológico sobre ambas especies y aportan antecedentes de interés para su evaluación y utilización en futuros programas de mejoramiento e hibridación del género *Corymbia*.

4. CONCLUSIONES

La caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* y *Corymbia torelliana* amplía el conocimiento tecnológico disponible para ambas especies en la Mesopotamia argentina y aporta antecedentes de interés para futuros programas de mejoramiento y estrategias de hibridación del género *Corymbia*.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen especialmente al productor Sergio Miño y a los auxiliares del grupo de calidad de madera del INTA Bella Vista: Carlo Lezcano, Juan Sánchez y Cristian Almiron por su apoyo en los trabajos de elaboración de probetas y muestreo a campo.

6. LITERATURA CITADA

- ARAUJO, S. L.; MELO, A. B.; OLIVEIRA, L. J.; SILVA, J. G. M.; ALMEIDA, M. N. F.; SILVA, P. H. M.; VIDAURRE, G. B.; GODINHO, T. F. 2023. Cor, grã e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus* não tradicionais. Scientia Forestalis, v. 51, e4029. Piracicaba, SP, Brasil. 14 p.
- CORONEL, E. O. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas: aspectos teóricos y prácticos para la determinación de las propiedades y sus aplicaciones. Santiago del Estero: El Liberal. 187 p.
- GIMENEZ, C. A.; HARRAND, L.; LÓPEZ, J. A.; MARTINEZ-MEIER, A. 2022. Daño por heladas y crecimiento de *Corymbia* spp. al segundo año de edad en Concordia, Entre Ríos, Argentina. IX Reunión del Grupo de Genética y Mejoramiento Forestal del INTA (GeMFO), Sáenz Peña, Chaco. 20 al 22 de septiembre de 2022. ISBN: 978-987-88-6537-9.



- GIMENEZ, C. A., LÓPEZ, J. A., VERA BRAVO, C. D., HARRAND, L., & MARTINEZ MEIER, A. 2025. Quantitative genetic variation in growth, cold tolerance and wood density of *Corymbia citriodora* subsp. *variegata* and *Corymbia torelliana* in Argentina. *New Forests*, 56, 44. <https://doi.org/10.1007/s11056-025-10112-x>
- LEE, D. J. (2007). Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand 2: Development of *Corymbia* species and hybrids for plantations in eastern Australia. *Australian Forestry*, 70(1), 11-16.
- LÓPEZ, J. A. 2005. Mejoramiento genético de la calidad de la madera. I Jornada Sobre Potencialidad Foresto-Industrial del Eucalipto En Santiago Del Estero 16 y 17 de junio de 2005. 6 p.
- LÓPEZ, J. A.; VERA BRAVO, C. D. 2016. Variación de las propiedades físicas de la madera de *Corymbia* spp. Subprograma *Eucalyptus* y otras latifoliadas (*Corymbia* y *Grevillea*). En: Marcó, M. A.; Llavallol, C. I. (Eds.). Domesticación y mejoramiento de especies forestales. 1.ª ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Ministerio de Agroindustria, Unidad para el Cambio Rural (UCAR). pp. 70-71. ISBN 978-987-1873-40-1.
- LÓPEZ, J. A.; VERA BRAVO, C. D. 2018. Crecimiento y rectitud del fuste de orígenes geográficos de *Corymbia* spp. en la Mesopotamia argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 44(3): 309-315.
- REIS, C. A. F.; ASSIS, T. F.; SANTOS, A. M.; PALUDZYSZYN FILHO, E. 2014. *Corymbia torelliana*: estado da arte de pesquisas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas. 67 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1002400>.
- R CORE TEAM. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- SEGURA, T. E. S. 2015. Avaliação das madeiras de *Corymbia citriodora*, *Corymbia torelliana* e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada (Doctoral dissertation), Tese (Doutorado em Recursos Florestais). Piracicaba: ESALQ. 198 p.



CURVAS DE SECADO AL AIRE LIBRE DE ROLLIZOS DE TRES CLONES DE EUCALIPTOS

Leonel HARRAND¹, Matias S. MARTINEZ¹, Ciro A. MASTRANDREA¹

RESUMEN

Las plantaciones de eucalipto en la región de Entre Ríos constituyen una de las principales producciones regionales, donde una fracción de la biomasa se destina a la denominada industria de la "madera redonda" o para triturado. Al reducirse el peso del material transportado, disminuyen sensiblemente los costos logísticos. La pérdida de humedad de la madera depende principalmente de las condiciones climáticas locales, aunque también se ve afectada por variables intrínsecas del material. El objetivo de este trabajo es evaluar y describir las curvas de secado al aire en trozas de tres clones de eucalipto (EG-INTA-36, GC-INTA-9 y GC-INTA-27), con diámetros entre 5 y 23 cm. Se analizó la evolución de la pérdida de humedad y la densidad en verde de la madera. Se ajustó una curva de pérdida de humedad para cada clon en función del tiempo y del diámetro de la troza, además de una curva general en función de la densidad anhidra. Se encontraron diferencias estadísticas en el comportamiento de los materiales, observándose un secado más rápido en el clon EG-INTA-36, de menor densidad. Las curvas ajustadas pueden considerarse como una guía inicial para la estimación de la pérdida de humedad en rollizos finos de eucalipto para la región de Entre Ríos.

Palabras clave: *Biomasa forestal, contenido de humedad, modelación, madera redonda.*

1. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones de eucalipto en la región de Entre Ríos constituyen una de las principales producciones regionales. Si bien se implantan mayoritariamente para su uso en aserrado, una fracción de la biomasa se destina a la denominada industria de la madera "redonda" -es decir, postes, tutores, rodrigones y tijeras-, o bien al astillado para la obtención de celulosa y la fabricación de tableros de partículas o fibras. Estos destinos industriales trabajan con diferentes contenidos de humedad de la madera; sin embargo, al reducirse el peso del material transportado, disminuyen sensiblemente los costos logísticos y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al transporte (Rezende et al., 2010; Strandgard et al., 2023).

La pérdida de humedad de la madera depende principalmente de las condiciones climáticas locales, pero también se ve afectada por variables intrínsecas del material: la densidad, el tamaño (diámetro y largo) de los rollizos, el descortezado y el método de apilado (Strandgard et al., 2023).

Históricamente, las plantaciones de eucalipto en Entre Ríos se han establecido a partir de semillas de *Eucalyptus grandis*. Sin embargo, en la última década se ha incrementado la superficie implantada con clones selectos de esta especie, así como con híbridos interespecíficos (SAGyP, 2024). Debido a su mayor homogeneidad genética y a las propiedades particulares de la madera en el caso de los híbridos (López et al., 2016), estos materiales pueden presentar un comportamiento diferencial frente al secado al aire. Por lo tanto, resulta indispensable evaluar dicha dinámica para optimizar la planificación del tiempo transcurrido entre la cosecha y el transporte.

El objetivo de este trabajo es evaluar y describir las curvas de secado al aire en trozas de tres clones de eucalipto en la zona de Concordia (Entre Ríos), a lo largo de un período de siete meses.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material de estudio provino de un lote demostrativo de diferentes clones de eucalipto, implantado en la EEA Concordia del INTA (Entre Ríos) en octubre de 2014. Se seleccionaron tres clones: uno de *E.*

¹ INTA, EEA Concordia, Entre Ríos, Argentina. *Contacto: harrand.leonel@inta.gob.ar



grandis (EG-INTA-36) y dos híbridos de *E. grandis* x *E. camaldulensis* (GC-INTA-9 y GC-INTA-27). En junio de 2021 (6,7 años), se realizó un raleo del 50 %, extrayendo unos 30 árboles por clon. Los fustes se trozaron a un largo promedio de 2,4 m. Las trozas se dispusieron en tres pilas independientes según el clon, con una altura aproximada de 1,20 m y bajo dosel arbóreo. Se identificaron 30 trozas por cada clon, abarcando todo el rango de diámetros presentes (6 cm a 23 cm).

Entre el 30 de junio de 2021 y el 11 de febrero de 2022 (226 días), se registró el peso de cada troza - ubicadas en la sección superior y rotadas aleatoriamente- en 12 oportunidades. Se utilizó un dinamómetro electrónico (tipo pilón, precisión 0,1 kg). Inicialmente las mediciones fueron quincenales y a partir de noviembre, mensuales.

Con la longitud total y el diámetro de ambos extremos, se determinó el volumen inicial en verde (Vv) de cada troza mediante la fórmula de Smalian. Con el peso registrado se calculó, para cada fecha, la densidad en húmedo basada en Vv (DH, kg/m³) y la de pérdida de humedad (PH, %) en función del peso inicial. Al finalizar, se extrajeron muestras de los extremos para determinar, mediante secado en estufa y desplazamiento de líquido, el contenido de humedad final (CH, %) y la densidad anhidra (DA, kg/m³).

Con los valores de PH y DH se realizó un análisis de varianza (ANOVA). Se empleó un modelo lineal mixto mediante el paquete lme4 en el entorno estadístico R, considerando el clon y el tiempo como factores fijos y el diámetro como covariable. Se efectuó el ajuste de curvas de estimación de la pérdida de humedad en función de estos mismos factores, junto con un segundo ajuste generalizado basado en la densidad anhidra de la madera.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan las dimensiones de las trozas evaluadas al inicio y al final del ensayo. Se observa que, aun partiendo de trozas con dimensiones similares entre los distintos materiales, DH y DA del clon EG-INTA-36 difieren de la registrada en los clones híbridos; no obstante, el contenido de humedad final resulta similar en los tres casos. Esto supone una estructura celular diferente en la madera de cada clon, que afecta el movimiento del agua dentro de la madera. Las diferencias de densidad entre clones de *E. grandis* e híbridos *E. grandis* x *E. camaldulensis*, se encuentran registradas en varias publicaciones, mostrando cómo la genética de *E. camaldulensis* influye en esta característica (Bulman Hartkopf et al., 2024; López et al., 2016; Martínez et al., 2023). Bulman Hartkopf et al. (2026) mencionan en los híbridos *E. grandis* x *E. camaldulensis* fibras más esbeltas, con mayor proporción de pared celular y lumen más angosto que *E. grandis*. Según Monteiro et al. (2017), las fibras largas y anchas con un gran diámetro de lumen favorecieron el secado, y las paredes celulares gruesas dificultaron el movimiento del agua.

Cuadro 1. Diámetros medio, pesos al inicio y al final de la evaluación (mínimos y máximos), densidad en húmedo (promedio, al inicio y final), contenido de humedad y densidad anhidra (promedios, al final), de las trozas evaluadas para tres clones de eucalipto.

	Diámetro (cm) (min. - máx.)	Peso inicial (kg) (min. - máx.)	Peso final (kg) (min. - máx.)	DH (kg/m ³) (ini. - fin.)	CH (%) (fin)	DA (kg/m ³) (fin)
EG-INTA-36	6,9 – 18,8	7,7 – 63,9	4,1 – 33,9	874 – 462	24	482
GC-INTA-9	7,2 – 21,2	10,6 – 79,1	4,8 – 44,9	1038 – 520	26	572
GC-INTA-27	6,6 – 19,4	8,8 – 79,9	4,4 – 44,6	1074 – 553	25	596

En el Cuadro 2 se detallan las condiciones ambientales registradas durante el período de evaluación. Si bien las temperaturas se mantuvieron dentro de los rangos normales con respecto a los valores históricos, las precipitaciones entre agosto y noviembre de 2021 fueron ligeramente inferiores a la media, mientras que en enero se situaron por encima del promedio histórico.

Para el análisis de los datos se consideró el factor días mediante un ajuste cuadrático, dado que la pérdida de humedad de la madera tiende a describir una curva asintótica (Jankowsky y Santos, 2005). Asimismo, se evaluó la inclusión de la covariable diámetro en forma lineal o cuadrática; si bien el ajuste estadístico resultó significativamente mejor en el segundo caso, el impacto práctico de esta variable (diámetro al cuadrado) en los cálculos finales es mínimo (datos sin mostrar).



Cuadro 2. Condiciones ambientales registradas en el Observatorio Meteorológico de la EEA Concordia durante julio/2021 a febrero/2022.

	Julio	Agosto	Septiem.	Octubre	Noviem.	Diciembre	Enero	Febrero*
Temp. Media (° C)	12,5	14,6	17,4	19,0	22,4	26,0	27,5	24,6
H.R media (%)	83	80	74	63	72	49	60	55
Precipitación (mm)	57	17	78	77	90	2	150	0
Días de lluvia	4	2	10	4	6	1	10	0

*En febrero se considera solamente hasta el día 11/02

Los ANOVA indicaron un claro efecto significativo de todos los factores considerados, tanto en PH como DH (datos no mostrados). El factor genético del clon señala claramente que los materiales no son iguales. A medida que pasan los días, la pérdida de humedad acumulada aumenta de manera lineal muy marcada, pero también la velocidad de secado se va desacelerando conforme pasan los días y se acerca al equilibrio (comportamiento curvo/asintótico). Los resultados muestran también la validez de considerar el diámetro medio como covariable, indicando que diámetros más pequeños pierden agua más rápido que los más gruesos debido a la relación superficie/volumen.

Dada la interacción significativa entre Clon y Días muestra diferentes respuestas de pérdida de secado entre los clones en el transcurso del tiempo, se realizó contrastes entre pares de clones para 5 momentos diferentes (Cuadro 3). Puede observarse que para PH, al final de la evaluación los tres clones se diferencian entre sí, pero al inicio, el clon GC-INTA-27 posee una PH diferente que los otros, comportándose luego semejantes los tres clones el resto del tiempo, luego de los 175 de evaluados, el clon GC-INTA-9 se diferencia del EG-INTA-36. Para DH, el clon EG-INTA-36 es diferente en todo momento a los otros, mientras que GC-INTA-9 y GC-INTA-27 solo presentan diferencias al principio y al final del período (Gráfico 1).

Cuadro 3. Contrastes entre clones (valores de probabilidad estadística de diferencia) para las variables Pérdida de Humedad y Densidad en Húmedo para 3 clones de eucaliptos, en cinco momentos.

Días	Pérdida de Humedad					Densidad en Húmedo				
	25	75	125	175	225	25	75	125	175	225
EG-36 vs GC-27	0.0508	0.0122	0.2429	0.5419	0.0005	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
EG-36 vs GC-9	0.9988	0.1241	0.5966	0.0212	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0012
GC-27 vs GC-9	0.0454	0.6261	0.7981	0.2292	0.0144	0.0021	0.0392	0.1095	0.0760	0.0190

p-valores ajustados por el método de Tukey.

El ajuste de una curva de PH en función del clon, del tiempo transcurrido (como factor polinómico de grado 2) y utilizando el diámetro medio de la troza como covariable de ajuste (Ecuación 1) nos permite estimar el tiempo necesario para disminuir el agua presente en las trozas. En el Cuadro 4 se presentan los coeficientes calculados para estas curvas.

$$PH = a + b * Tiempo + c * Tiempo^2 + Diámetro \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde: PH: pérdida de humedad; a,b,c: coeficientes de ajuste; Tiempo: días transcurridos desde la corta, Diámetro: diámetro medio de la troza.

Según dicho ajuste, para las condiciones ambientales dadas en esta evaluación, para trozas de entre 6 y 21 cm de diámetro y largos de 2,4 m, hay una pérdida de agua prácticamente lineal hasta alrededor de los 150 días transcurridos. Posteriormente comienza una disminución más gradual de humedad, más notable en el clon EG-INTA-36, el cual alcanzó el equilibrio higroscópico alrededor de los 180. Los otros dos clones (de mayor densidad de madera) continuaron perdiendo humedad aun pasado este período, siendo algo más marcado en el clon GC-INTA-9 (gráficos 1 y 2).

Quitando el efecto directo del clon, y considerando el valor de la densidad anhidra de cada troza, se obtuvo un nuevo ajuste de modelo según se indica en la Ecuación 2 y se representa en el Gráfico 2. Esta ecuación facilita la estimación de pérdida de humedad independientemente del clon que se utilice.

$$PH = 4.2061 + (0.0091 * DA) + (-0.7254 * d) + (0.6542 - 0.0004 * DA) * t + (-0.002138 + 0.000002 * DA) * t^2 \quad (\text{Ec. 2})$$



donde: PH : pérdida de humedad (%); d : diámetro medio de la troza (cm); DA : densidad anhidra (kg/m^3), t : tiempo (días).

Cuadro 5. Coeficientes de las curvas de ajuste de pérdida de humedad para tres clones de eucalipto, en función del tiempo transcurrido y del diámetro de la troza.

	Intercepto	Tiempo (días)	Tiempo ²	Diámetro (cm)
EG-INTA-36	9.2155	0.429618	- 0.000989	- 0.73436
GC-INTA-9	10.1358	0.387334	- 0.000738	- 0.73436
GC-INTA-27	8.5340	0.411912	- 0.000850	- 0.73436

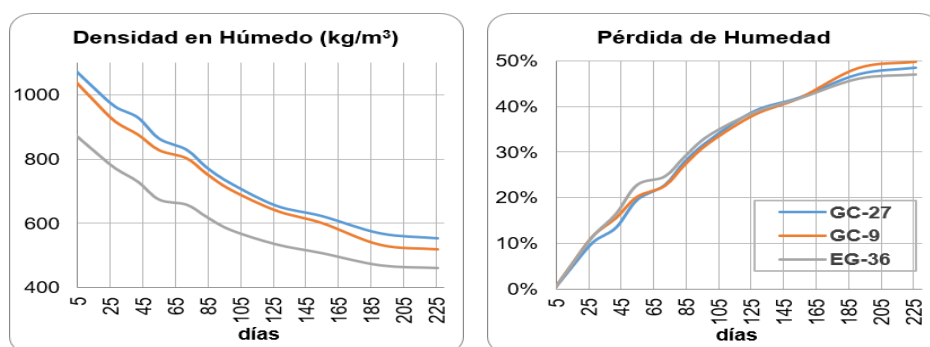


Gráfico 1. Curvas medidas de Densidad en Húmedo y Pérdida de Humedad (promedios para todas las trozas) para tres clones de eucalipto.

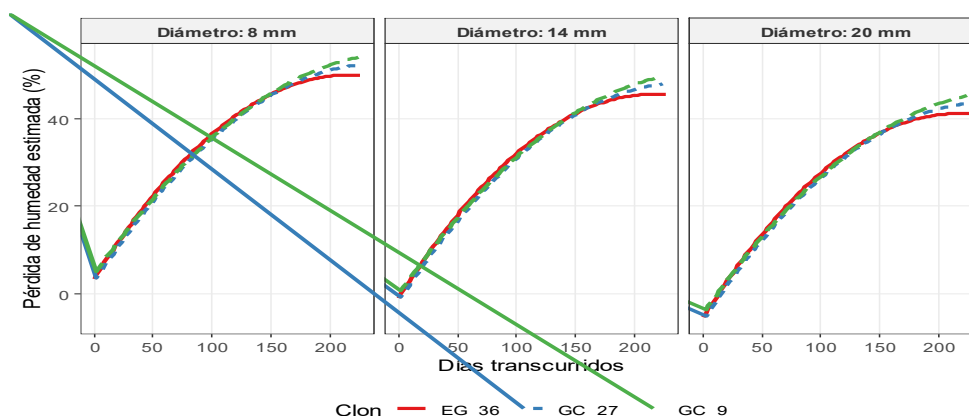


Gráfico 2. Curvas estimadas de pérdida de humedad de trozas de eucalipto, según diámetro inicial de la troza. Predicciones del Modelo Lineal Mixto con ajuste cuadrático en el tiempo.

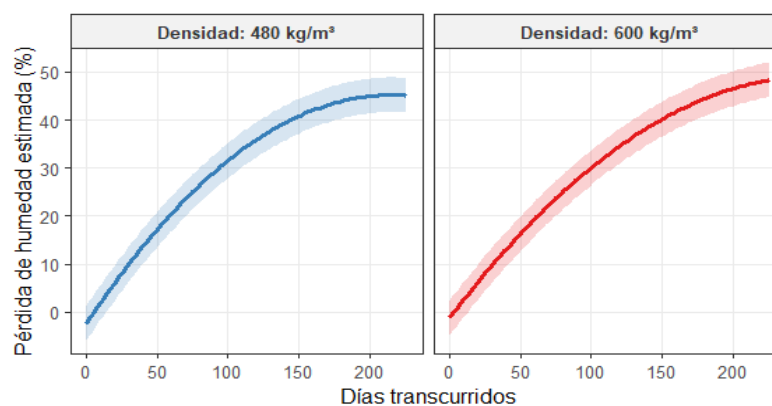


Gráfico 3. Curvas estimadas de pérdida de humedad de trozas de eucalipto, según densidad anhidra de la madera y diámetro inicial de la troza. Estimación para dos densidades de madera (480 y 600 kg/m^3), curva media para un diámetro de 15 cm (rango entre 10 cm -superior- y 20 cm -inferior-).



Similar a lo encontrado en este trabajo, Vinha Zanuncio et al. (2015), para trozas de *Eucalyptus* y *Corymbia*, encontraron correlaciones negativas entre la densidad básica de la madera vs el contenido de humedad inicial y la tasa de secado. De igual manera, estos mismos autores mencionan que un mayor diámetro aumenta la distancia recorrida por el agua dentro de la madera y reduce su velocidad de secado. França et al. (2019) mencionan que la densidad aparente de la madera explica el 70,5 % de la tasa de secado en madera de clones híbridos *E. grandis* x *E. urophylla*.

Las curvas estimadas en este trabajo poseen la limitante de estar ajustadas para condiciones ambientales particulares y solamente tres clones de eucalipto con poca variación en la DA que poseen, sin embargo, pueden resultar útiles como una primera guía de estimación para condiciones similares.

4. CONCLUSIONES

Estos resultados demuestran que la pérdida de humedad de la madera en trozas finas de eucalipto se encuentra fuertemente asociada al material genético (clon) que se considere, al diámetro de las trozas y al tiempo transcurrido. La densidad de la madera condiciona la pérdida de humedad, ralentizándose esta pérdida cuanto mayor diámetro poseen las trozas y cuanto mayor es la densidad de la madera.

Las curvas ajustadas en este trabajo pueden considerarse una guía inicial para la estimación de pérdida de humedad en rollizos finos de eucalipto, para la región de Entre Ríos.

5. LITERATURA CITADA

- BULMAN HARTKOPF, C.; GONZALEZ, K.; MARTINEZ, M.; MASTRANDREA, C.; WINCK, R.; STEFANI, P. 2026. Caracterización anatómica de fibras de clones puros e híbridos de *Eucalyptus* sp. Revista Forestal Yvyrareta. 1. <https://doi.org/10.36995/j.yvyrareta.2026.001>
- BULMAN HARTKOPF, C.; WINCK, R.; AQUINO, D.; FASSOLA, H.; STEFANI, P. 2024. Densidad y proporción de albura y duramen en nuevos clones de *Eucalyptus* spp. Maderas-Cienc Tecnol. 26. <http://dx.doi.org/10.22320/s0718221x/2024.24>
- FRANÇA, F.J.N.; MACIEL, A.P.V.; FRANÇA, T.S.F.A.; SILVA, J.G.M.; BATISTA, D.C. 2019. Air-drying of seven clones of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* wood. BioResources 14(3). pp 6591-6607.
- JANKOWSKY, I.P. and SANTOS, G.R. V. DOS. 2005. Drying behavior and permeability of *Eucalyptus grandis* lumber. Maderas. Ciencia y Tecnología, 7(1), 17-21. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2005000100002>
- LÓPEZ, J.A.; HARRAND, L.; MARCÓ, M.A.; LÓPEZ, A.J. 2016. Variación genética de clones híbridos de *Eucalyptus*. Quebracho 24(1,2), pp 5-17
- MARTÍNEZ, M.S.; MASTRANDREA, C.A.; WINK, R.A.; HARRAND, L.; OBERSCHELP, G.P.J. 2023. Variación radial y axial de la densidad de la madera en clones de Eucalipto. VIII Congreso Latinoamericano y V Argentino Forestal. Mendoza, Argentina. pp 650-652
- MONTEIRO, T.; LIMA, J.; GHERARDI HEIN, P.R.; SILVA, J.; TRUGILHO, P.; ANDRADE, H. 2017. Efeito dos elementos anatômicos da madeira na secagem das toras de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 493-505.
- SAGyP. 2024. Tablero de plantaciones forestales. Desarrollo Foresto-Industrial, Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca, Ministerio de Economía, República Argentina. Datos actualizados a septiembre de 2024. <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/inventarios/tablero.php>
- REZENDE, R.; LIMA, J.; SILVA, J.; NAPOLI, A.; ANDRADE, H.; FARIA, A. 2010. Air drying of logs from an *Eucalyptus urophylla* clone for carbonization use. CERNE. 16. 565-572. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000400016>
- STRANDGARD, M.; MOHAMMAD, S.; TURNER, P. 2023. Evaluating the impact of meteorological data sources on moisture prediction accuracy of eucalyptus nitens log pile natural drying models. Croatian Journal of Forest Engineering. 44(2). <http://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1757>
- VINHA ZANUNCIO, A.J.; GUIMARÃES CARVALHO, A.; FERNANDES DA SILVA, L.; TARCISIO LIMA, J.; TRUGILHO, P.F.; MOREIRA DA SILVA, J.R. 2015. Predicting moisture content from basic density and diameter during air drying of *Eucalyptus* and *Corymbia* logs. Maderas. Ciencia y Tecnología, 17(2), 335-344. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000031>.



PRIMERA APROXIMACIÓN DE RENDIMIENTO DE CINCO INDIVIDUOS DE *Eucalyptus sideroxylon*

Carla TARABORELLI¹; Dino A. PALAZZINI^{1,2}; Gabriel KEIL¹; Diego RAMILO¹; Ludmila PRUMAR¹; Pablo S. PATHAUER²

RESUMEN

En el sector forestal y agropecuario argentino la utilización de madera para carpintería rural es frecuente y emplea fundamentalmente especies de maderas duras proveniente de bosques nativos. Con el objetivo de disminuir la presión en dichos bosques, se propone la utilización de *Eucalyptus sideroxylon*, cuya madera presenta características que le confieren potencial para la producción de elementos destinados a carpintería rural. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el rendimiento de aserrado de cinco individuos de *Eucalyptus sideroxylon*. Las trozas fueron procesadas mediante aserrado convencional, tangencial abierto utilizando una sierra sinfín vertical de avance manual. Posteriormente, las tablas obtenidas fueron reaserradas para la producción de varillas con una escuadría de 1,5 × 1,5 cm. El rendimiento de aserrado se calculó como la relación entre el volumen de madera aserrada obtenida y el volumen de la troza sin corteza procesada, expresado en porcentaje. Los resultados mostraron una marcada variabilidad entre los individuos evaluados, registrándose rendimientos comprendidos entre 40,60% y 70,15%. Asimismo, no se observó una relación directa entre el volumen de las trozas y el rendimiento alcanzado.

Palabras clave: *aserrado, carpintería rural, mejoramiento genético*

1. INTRODUCCIÓN

En el sector forestal y agropecuario argentino la utilización de madera para carpintería rural es frecuente, ya que el material se utiliza principalmente como postes y varillas para alambrados, tranqueras, rodrigones, varillas para viñedos, mangas y cargadores para manejo de ganado, comederos, estructuras de galpones entre otras. Dichos productos, al estar expuestos a condiciones de intemperie y en muchos casos enterrados, tienen como requerimiento una alta durabilidad natural frente a agentes de degradación biótica y abiótica, además de una adecuada resistencia mecánica frente a diversos requerimientos (Forest Products Laboratory, 2010).

Tradicionalmente, para este tipo de productos se utilizan especies que provienen de bosques nativos, como quebracho colorado (*Schinopsis balansae*), algarrobo, caldén (*Neltuma* spp.), cebil (*Anadenanthera colubrina*), entre otras, dado que poseen alta durabilidad natural (Tortorelli, 2009; Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2015), así como también especies cultivadas como *Eucalyptus camaldulensis*, *E. tereticornis*, entre otros que son ampliamente utilizados. Pese a su amplia difusión y aceptación en el ámbito rural, el uso de estas especies genera cuestionamientos desde el punto de vista ambiental, por encontrarse varias de ellas clasificadas con grados de conservación que denotan alguna amenaza a su persistencia presente y futura. Es por lo que su aprovechamiento está limitado, lo que genera escases en el mercado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, 2022) y mayores costos de la materia prima.

Una alternativa a las maderas procedentes de bosque nativo son las provenientes de plantaciones forestales, lo que contribuye a disminuir la presión sobre los recursos forestales nativos a la vez que asegura una producción continua de materia prima para abastecer al mercado. Dentro de las especies cultivadas, el género *Eucalyptus* ha adquirido creciente importancia debido a su rápido crecimiento y

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales - UNLP. Contacto: carla.taraborelli@agro.unlp.edu.ar

² Instituto de Recursos Biológicos - INTA. Contacto: pathauer.pablo@inta.gob.ar

versatilidad de usos. Particularmente, *Eucalyptus sideroxylon* se caracteriza por presentar madera de densidad media alta, elevada resistencia mecánica y alta durabilidad natural, propiedades que le confieren potencial para su utilización en productos destinados a carpintería rural (Bootle, 2005). Asimismo, la especie presenta buena aptitud de uso en servicio frente a condiciones ambientales adversas, constituyendo una posible alternativa al empleo de maderas nativas tradicionales.

En Argentina, actualmente se desarrolla un programa de mejoramiento genético orientado a evaluar diferentes materiales genéticos de *Eucalyptus sideroxylon*, con el objetivo de identificar individuos con características tecnológicas y productivas favorables. En este sentido, resulta fundamental generar información relacionada con el comportamiento industrial de la especie, particularmente en aspectos vinculados al procesamiento mecánico y al aprovechamiento de la madera.

Entre los parámetros de mayor relevancia en la industria del aserrado se encuentra el rendimiento, determinado por la relación entre el volumen de madera aserrada obtenida y el volumen de rollizos procesados. El estudio del rendimiento permite evaluar la eficiencia del aserrado. Diversos autores han señalado que el rendimiento en eucaliptos puede verse afectado por factores como el diámetro de los rollizos, las tensiones de crecimiento, la presencia de defectos y el sistema de corte utilizado (Touza Vázquez, 2001; Mastandrea, 2016). Asimismo, estudios realizados en distintas especies del género indican que la evaluación del rendimiento constituye una herramienta fundamental para determinar su potencial utilización en productos sólidos de madera y optimizar los procesos de transformación industrial.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el rendimiento en aserrado de cinco trozas de 5 individuos diferentes de *Eucalyptus sideroxylon*, con el fin de generar información tecnológica sobre su potencial utilización en la elaboración de productos de carpintería rural.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Material leñoso

Se seleccionaron cinco individuos de *Eucalyptus sideroxylon* de 8 años en un ensayo de progenies que tiene como densidad 1666 plantas por hectárea, instalado en el predio del Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias (CNIA-INTA) ubicado en Hurlingham, provincia de Buenos Aires, Argentina. Los 5 rollizos (1 por individuo) fueron recibidos en el LIMAD (Laboratorio de Investigaciones en Madera), cuyos diámetros en punta fina variaron entre 8,7 y 14,8 cm, los diámetros en punta gruesa entre 11,0 y 16,5 cm y las longitudes entre 37,4 y 50,9 cm, cabe destacar que se aserraron dichas dimensiones, debido a que es una primera aproximación de aserrado de la especie.

Aserrado

Se optó por un aserrado convencional. Se llevó a cabo mediante una sierra sinfín vertical simple, operada con sistema de avance manual. Se aplicó un patrón de corte tangencial abierto, según el esquema presentado en la Figura 1.

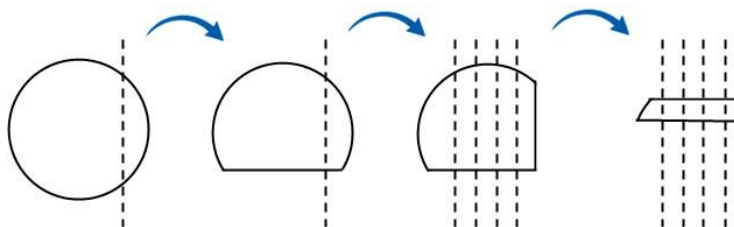


Figura 1. Sistema de corte

En una primera etapa, se efectuó un corte inicial con el fin de eliminar la primera tabla, la cual correspondía al costanero. Posteriormente, la troza fue girada 90° y se realizó un nuevo corte, dejando dos caras libres perpendiculares entre sí. Se continuó con el proceso de tableado mediante cortes sucesivos paralelos, siguiendo el patrón tangencial definido. Finalmente, las tablas obtenidas fueron



redimensionadas, generando varillas de una escuadría de 1,5 × 1,5 cm, las cuales fueron utilizadas para los análisis posteriores.

Los costaneros generados en los cortes iniciales fueron descartados.

Rendimiento y volumen

En primer lugar, se determinó el volumen de las trozas utilizando la fórmula de Smalian, mediante la medición de los diámetros en punta fina y punta gruesa. A partir de estos valores, se calcularon los rendimientos de aserrado sin corteza (R_{sc}), expresados en porcentaje, según la siguiente expresión:

$$R_{sc} = \left(\frac{V_{as}}{V_{ts}} \right) \times 100 \text{ Formula 3}$$

donde: V_{as} : volumen total de madera aserrada; V_{ts} : volumen de la troza sin corteza.

Este procedimiento se repitió para cada individuo analizado.

Para la determinación del rendimiento de aserrado, se consideró como volumen de productos el conformado únicamente por varillas que no presentaban defectos (corteza incluida, nudos, arista faltante, entre otras). Manteniendo la identidad del árbol de origen, se midieron las dimensiones base (b), altura (h) y longitud (L) de cada varilla. A partir de estas mediciones, se calculó el volumen individual de cada pieza mediante la siguiente expresión:

$$V = b \times h \times L \text{ Formula 1}$$

El volumen total de madera aserrada por individuo (V_{as}) se obtuvo como la sumatoria de los volúmenes individuales:

$$V_{as} = \sum_{i=1}^n V_i \text{ Formula 2}$$

donde n es el número total de varillas consideradas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento y volumen

Según los resultados observados (Gráfico 1, Tabla 1), los valores de rendimiento fluctuaron entre 40,6% y 70% (Tabla 1), entendiendo que el valor que presenta el individuo n° 123 es atípico, aunque el mismo alcanzó el mayor rendimiento de aserrado (70,15%) a pesar de no presentar la troza de mayor volumen. Por el contrario, el individuo 120 registró el mayor volumen de troza y la mayor cantidad de varillas obtenidas, aunque su rendimiento fue considerablemente inferior (47,24 %), aunque el mismo suele ser acorde a los valores hallados en la bibliografía. Este comportamiento evidencia que el tamaño de la troza, a priori, no explicó por sí solo las diferencias observadas en el rendimiento, pudiendo estar afectados los valores obtenidos a las calidades de las trozas originadas de cada individuo, teniendo en cuenta que son resultados preliminares, observados en una troza por individuo. Los individuos 120, 121 y 124 mostraron valores intermedios, comprendidos entre 45 % y 50 % (Tabla 1).

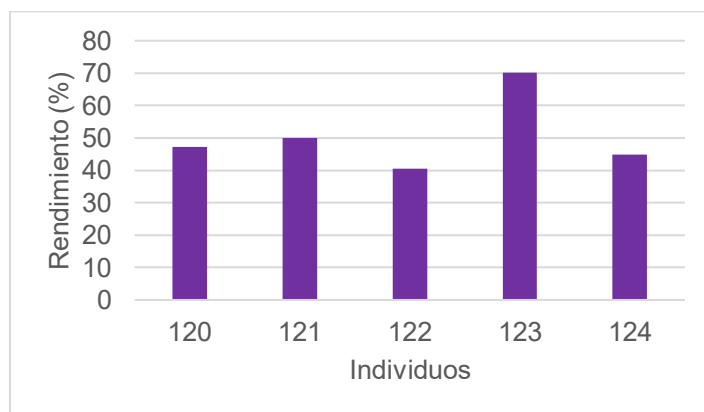


Gráfico 1. Rendimiento de aserrado de los individuos.



Tabla 1. Parámetros de las trozas y rendimiento de aserrado obtenidos para los 5 individuos evaluados.

Individuo	Dpf (cm)	Dpg (cm)	Largo (cm)	Volumen troza (cm ³)	n varillas	Volumen medio varillas (cm ³)	Rsc (%)
120	14,8	16,5	43,5	8488,88	27	148,52	47,24
121	10,7	12,5	39,3	4252,77	20	106,13	49,91
122	10,0	13,0	37,4	3908,53	13	122,07	40,60
123	10,5	11,0	48,9	4540,58	18	176,95	70,15
124	8,7	11,0	50,9	3939,24	12	147,40	44,90

Nota: Dpf: diámetro punta fina; Dpg: diámetro punta gruesa; n: cantidad de varillas; Volumen medio de varillas; Rsc: rendimiento sin corteza.

Diversos autores señalan que el rendimiento de aserrado suele incrementarse a medida que aumenta el diámetro de las trozas (Steele 1984; Walker, 2006). Al mismo tiempo, Malan (1995) también indica que el aprovechamiento de la madera puede verse afectado por factores adicionales al diámetro, tales como la forma de la troza, la presencia de defectos, la excentricidad de la médula y las tensiones de crecimiento. En este estudio, los defectos hallados fueron presencia de nudos y corteza incluida principalmente, de esta manera, aquellas trozas que presentaban estos defectos fueron descartadas. Es preciso mencionar que la presencia de defectos fue muy baja, alrededor del 5%, aproximadamente 1 varilla por individuo y en algunos casos ninguna varilla fue descartada. Estos resultados sugieren que, además de las dimensiones de la materia prima, podrían existir otros factores, como las características individuales de cada troza y la interacción de esta con el patrón de corte empleado que podrían haber influido sobre el rendimiento.

Asimismo, cabe destacar, que, si bien se observaron fluctuaciones en el rendimiento de los individuos, en su conjunto se obtuvieron valores muy altos y promisorios de rendimiento de *Eucalyptus sideroxylon*.

En estudios posteriores debieran incorporarse factores que cuantifiquen la calidad de la troza y relacionarlos con rendimiento y diámetro.

4. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos, aunque preliminares, evidenciaron variabilidad en el rendimiento de aserrado entre los cinco individuos de *Eucalyptus sideroxylon* evaluados en su conjunto se obtuvieron valores muy altos y promisorios. Asimismo, no se observó una relación directa entre el volumen de las trozas y el rendimiento alcanzado, ya que el individuo con mayor volumen de troza presentó un rendimiento intermedio en comparación con los individuos estudiados, pero con un rendimiento normal para la especie, es por ello que es propicio ampliar el estudio a una mayor cantidad de trozas. En conjunto, los rendimientos obtenidos indican que *Eucalyptus sideroxylon* presenta aptitud potencial para la producción de varillas destinadas a carpintería rural, constituyendo una alternativa al uso de especies nativas tradicionalmente empleadas para estos fines.

5. LITERATURA CITADA

BOOTLE, K.R. 2005. *Wood in Australia: Types, properties and uses* (2nd ed.). McGraw-Hill.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. 2015. *Manual de maderas argentinas*. INTI. <https://www.inti.gob.ar/publicaciones>

Forest Products Laboratory. 2010. Wood handbook: Wood as an engineering material (General Technical Report FPL-GTR-190). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

MALAN, F.S. 1995. Eucalyptus improvement for lumber production. In Anais do Seminário Internacional de Utilização da Madeira de Eucalipto para Serraria (pp. 1–19). Sao Paulo, Brasil.

MASTANDREA, C. 2016. Determinación del rendimiento de aserrado y grados de calidad de rollizos de *Eucalyptus grandis* en Entre Ríos. Proyecto de Investigación Aplicada (PIA 10080)



MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA NACIÓN. 2022. Monitoreo de la superficie de bosque nativo de la República Argentina. Período 1998–2021. Dirección Nacional de Bosques.

STEELE, P.H. 1984. Factors determining lumber recovery in sawmilling (General Technical Report FPL-39). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

TORTORELLI, L.A. 2009. Maderas y bosques argentinos. Orientación Gráfica Editora.

TOUZA VAZQUES, M. 2001. Proyecto de investigación sobre sistemas de aserrado adecuados para procesar *Eucalyptus globulus* con tensiones de crecimiento. CIS-Madera. 6. 8-37.

WALKER, J.C.F. (ED.). 2006. Primary wood processing: Principles and practice (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4393-7>



CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DE BIOMASA GENERADA POR PODA INICIAL Y RALEO EN UNA PARCELA EXPERIMENTAL DE PINO OREGON EN CHUBUT

Martín HONORATO¹, Luis TEJERA²

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo cuantificar la biomasa residual obtenida de la primera poda y raleo de *Pseudotsuga menziesii* (pino oregón) en la región andino-patagónica. Para ello se instaló una parcela de 500 m², persiguiendo el esquema de manejo regional determinado por el sitio y edad para esta especie, donde se realizaron podas hasta el 50 % de la altura de las mejores plantas y un raleo a 600 pl/ha remanente. Se midieron ramas y copas en estado verde, determinando humedad y clasificando fracciones finas y gruesas, además de cubicarse los fustes. Los resultados mostraron un total de 7,9 toneladas de masa seca por hectárea, de las cuales el 71 % correspondió a fracción fina (ramillas y hojas) y el 29 % a fracción gruesa (fustes y ramas mayores a 1,4 cm). En conclusión, estos datos sirven de base para orientar decisiones sobre el destino o tratamiento de los residuos, aunque deben interpretarse como referencia preliminar y exploratoria.

Palabras clave: *biomasa residual, manejo silvícola, Patagonia andina*

1. INTRODUCCIÓN

La Estación Experimental Agroforestal (EEAf) de INTA Esquel tiene incumbencia sobre una región que posee gran aptitud para la implantación de bosques de diferentes especies. En el caso del pino, se llevan plantadas cerca de 30 000 ha. En esta importante superficie forestada es necesario el manejo mediante podas y raleos para proveer madera de calidad al turno de rotación. Estas intervenciones contribuirán a mejorar y mantener un buen estado sanitario, resguardar aspectos ambientales favorables y minimizar el riesgo de incendios forestales. Para generar resultados económicos positivos para los dueños de los bosques y demás actores de la cadena de valor foresto-industrial, así como para la creación de empleo sectorial, es fundamental que dichas medidas se apliquen en el tiempo y la forma adecuadas.

La utilización de la madera que se obtiene de tales intervenciones no representa un problema significativo en otros lugares de Argentina y en otros países, donde existen industrias de triturado que incorporan esta materia prima, de bajo diámetro y calidad —debido a las limitaciones tecnológicas derivadas de la madera juvenil. Sin embargo, en la región andino-patagónica, la carencia de este tipo de industrias y la baja probabilidad de que las mismas se desarrollen (especialmente las industrias de pulpa) representan una dificultad para viabilizar las cortas de conducción (Loguercio et al., 2008).

Sin embargo, estos residuos podrían ser utilizados en la generación de energía calórica y/o eléctrica. En el caso de energía calórica, existen tecnologías disponibles que permiten el uso de estos residuos en diferentes formas más o menos elaboradas, desde producto bruto hasta pellets. Por otro lado, la calefacción en la Patagonia es un problema no resuelto para la población que no cuenta con el suministro de gas natural de red. En ese sentido, la provincia de Chubut destina fondos a través del Plan Calor para abastecer de leña para calefacción a las familias de bajos recursos.

Es por todo ello que resulta importante obtener registros de biomasa residual proveniente de tratamientos silvícolas que valoricen dichos residuos.

¹ INTA Campo Experimental Agroforestal Trevelin. honorato.martin@inta.gob.ar

² INTA Estacion Experimental Agroforestal Esquel. tejera.eduardo@inta.gob.ar



2. MATERIALES Y MÉTODOS

Teniendo en cuenta los esquemas de manejo regionales (Davel et al., 2015), para esta especie, edad y calidad de sitio; se instaló una parcela de 500 m² representativa del esquema. Donde se midió el DAP y la altura de cada árbol. En el Cuadro 1, se observan los parámetros dasométricos tanto del esquema de manejo como de la parcela instalada.

Cuadro 1. Comparación de parámetros de esquema de manejo de raleo y poda (clase de sitio I zona 2 de pino oregon) vs Parcela. Donde: DCM: diámetro cuadrático medio

Edad (años)	Tratamiento	N°de árboles/ha		DCM [cm]		Altura dominante [m]		Altura de poda [m]	
		Esquema	Parcela	Esquema	Parcela	Esquema	Parcela	Esquema	Parcela
0	Plantación	1100	1100	-	-	-	-	-	-
8	Primera poda y raleo a desecho.	1025	940	9,42	7,4	6,1	7,4	-	-
8	post-raleo	600	600	10,5	8,3	6,1	7,4	3,4	3,3

Luego se realizó la poda hasta el 50 % de la altura de las mejores plantas. Raleando el resto a una densidad remanente de 600 pl/ha.

Se pesaron las ramas podadas en estado verde con una balanza tipo pilón con precisión 0,1 kg, para luego triturar y secar una alícuota en estufa de laboratorio a 105 °C durante 24 h y determinar el contenido de humedad mediante el método de pesajes a peso constante. Las proporciones de ramas finas, hojas y ramas gruesas se obtuvieron mediante una zaranda de 1,4 cm de diámetro de poro.

Se determinó la biomasa de copa y fuste de los árboles raleados.

3. RESULTADOS

Cuadro 2. Biomasa de fracciones. Dónde: W_{bh}: contenido de humedad en base húmeda. tms: tonelada de masa seca. ha: hectárea.

W _{bh} [%]	Ramas poda [tms/ha]		Fustes raleo [tms/ha]	Ramas raleo [tms/ha]		Total [tms/ha]
	Finas y hojas	Gruesas		Finas y hojas	Gruesas	
	3,8	1,1		1,8	0,5	
57	4,9		0,7	2,3		7,9

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En el Cuadro 1 se comparan los parámetros de densidad, diámetro cuadrático medio, altura dominante y altura de poda del esquema de manejo vs la parcela. Se observan magnitudes similares, por lo que se puede adoptar como una parcela representativa del esquema.

En el Cuadro 2 se observa un total de 7,9 tms/ha, siendo la fracción gruesas de 2,3 tms/ha (fustes y ramas de más de 1,4 cm de diámetro), mientras que 5,6 tms/ha de fracción fina (hojas y ramillas) representa un 71% del residuo. Valores aproximados de biomasa residual de raleo a desecho de entre 3 y 5 tms/ha son reportados por Gauto Acosta en 2019.

Estos datos contribuyen a la toma de decisiones respecto al destino o tratamiento de los residuos, considerando que constituyen valores de referencia de carácter preliminar y exploratorio.

5. LITERATURA CITADA

DAVEL, M.; CABALLÉ, G.; GONDA, H.; CHAUCHARD, L.; SBRANCIA, R.; BULGARELLI, L. 2015. Los tratamientos silvícolas. En Attis Beltrán, H., Barroetaveña, C., Bava, J., Banina, N., Bulgarelli, L., Caballé, G & Zalazar, G. (eds.). Manual de Buenas Prácticas para el manejo de plantaciones forestales en el noroeste de la Patagonia. (pp. 191-243). Buenos Aires: Ministerio de Agroindustria. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/107746>



- GAUTO ACOSTA, M. 2019. Plan de aprovechamiento de residuos dendroenergéticos de la provincial del Chubut. (Informe Final Parte I y Parte II). CIF. Recuperado de <http://biblioteca.cfi.org.ar/documento/plan-de-aprovechamiento-de-residuos-dendroenergeticos-de-la-provincia-del-chubut/>
- LOGUERCIO, G.; JOVANOVSKI, A.; MOLINA, J.; PANTAENIUS, P. 2008. Residuos de biomasa de forestaciones y aserraderos de la región andina de las provincias de Neuquén y Chubut. Evaluación preliminar de oferta. (Publicación Técnica N° 34), 1-70. Esquel, Argentina: CIEFAP.



SUBPRODUCTOS Y RESIDUOS DE ASERRADEROS CON POTENCIAL USO ENERGÉTICO EN EL DEPARTAMENTO CONCORDIA, ENTRE RÍOS, ARGENTINA

Federico LAROCCA¹, Ciro MASTRANDREA², Mario FLORES PALENZONA³; Matías MARTÍNEZ²

RESUMEN

Se publican aquí parte los resultados de un Proyecto de Investigación y Desarrollo que tuvo como objetivo evaluar los tipos y cantidad de subproductos y residuos generados por la foresto industria, su localización, el potencial de aprovechamiento energético y los costos asociados a dichos procesos identificando los residuos con mayor viabilidad. Se relevaron 95 aserraderos del departamento Concordia, de los cuales 72 se encontraban activos en 2026, operando al 48 % de la capacidad instalada. Se estimó una generación conjunta de 890 Mg·día⁻¹ de costaneros, 584 Mg·día⁻¹ de aserrín, 462 Mg·día⁻¹ de chips y 178 Mg·día⁻¹ de despuntes. Los resultados muestran que una proporción importante de estos subproductos — particularmente costaneros, chips y aserrín—se encuentra incorporados a circuitos comerciales, lo que reduce la disponibilidad de biomasa "residual" en sentido estricto, aunque persiste un margen relevante para desarrollar nuevas alternativas de valorización energética.

Palabras clave: *biomasa, forestoindustria, residuos, aserraderos*

1. INTRODUCCIÓN

La cadena foresto-industrial constituye una de las principales actividades económicas del noreste de la provincia de Entre Ríos, donde se concentra una importante superficie forestada y un significativo entramado industrial asociado a la transformación de la madera. En esta región predominan las plantaciones de *Eucalyptus grandis*, especie que representa la mayor parte de la materia prima utilizada por aserraderos, impregnadoras y otras industrias forestales.

A pesar de los avances tecnológicos registrados en las últimas décadas, el proceso de aserrado continúa generando una importante cantidad de residuos y subproductos. Diversos antecedentes indican que menos de la mitad del volumen de rollizos que ingresa a los aserraderos se transforma en madera aserrada, mientras que el resto corresponde principalmente a costaneros, despuntes, aserrín, viruta y otros materiales derivados del proceso industrial (Ministerio de Agroindustria, 2017). Estos materiales, tradicionalmente considerados residuos, representan actualmente una fuente potencial de biomasa susceptible de valorización mediante distintos usos industriales y energéticos.

La utilización energética de biomasa forestal ha cobrado creciente relevancia a nivel mundial como alternativa renovable a los combustibles fósiles. En este contexto, la provincia de Entre Ríos adhirió al Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica mediante la Ley Provincial N.º 10.499, en concordancia con las Leyes Nacionales N.º 26.190 y 27.191. Entre las fuentes renovables contempladas por esta normativa se incluye expresamente la biomasa, reconociendo su potencial para contribuir a la diversificación de la matriz energética y al aprovechamiento de recursos locales.

En 1987 Riegelhaupt, ya destacaba el potencial de las forestaciones implantadas como fuente de energía renovable, señalando tanto su capacidad para sustituir combustibles fósiles como su contribución indirecta a la conservación de los bosques nativos. Desde entonces, el interés por el aprovechamiento energético de la biomasa forestal ha aumentado considerablemente, impulsado por

¹ Universidad Tecnológica Nacional. FR Concordia, Grupo de Investigación en Administración Rural. federicol1968@gmail.com

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. EEA Concordia

³ Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Dir. Nacional de Desarrollo Foresto Industrial. Área de Extensión.



la necesidad de diversificar las fuentes de energía, mejorar el balance de gases de efecto invernadero y valorizar materiales residuales de origen biológico.

En la provincia de Entre Ríos se registran aproximadamente 147.000 hectáreas forestadas (Dirección General de Estadísticas y Censos de Entre Ríos, 2021), de las cuales alrededor del 80 % corresponde a eucaliptos. La actividad forestal genera importantes volúmenes de biomasa residual tanto en las etapas de cosecha como en los procesos industriales. Diversos estudios realizados en la región han evaluado la disponibilidad y el potencial aprovechamiento de los residuos de cosecha forestal para generación de energía (Briones, 2009; Morel, 2012; Bon y Pietrantuono, 2018; Larocca, Fink y Tesón, 2021). Sin embargo, dichos trabajos también señalan limitaciones operativas y ambientales asociadas a la extracción de estos materiales, particularmente por los costos de recolección y por la necesidad de conservar parte de la biomasa en el sitio para mantener el ciclo de nutrientes y la productividad futura de las plantaciones (Goya et al., 2009).

A diferencia de los residuos de cosecha, los generados en las industrias forestales se encuentran concentrados en playas de acopio y establecimientos industriales, lo que facilita su recuperación y eventual aprovechamiento. En el noreste de Entre Ríos operan más de 200 industrias vinculadas a la transformación primaria de la madera, principalmente aserraderos, que procesan mayoritariamente *Eucalyptus grandis*. Si bien predominan los establecimientos de pequeña escala orientados a la producción de embalajes, pallets y cajones, los aserraderos medianos concentran una parte importante del volumen industrializado.

Según el Censo Nacional de Aserraderos (Ministerio de Agroindustria, 2017), en Entre Ríos operaban 179 establecimientos que procesaban más de 2 millones de m³ de rollizos anuales para obtener aproximadamente 800.000 m³ de madera aserrada, generando más de 1,3 millones de m³ de residuos y subproductos. Complementariamente, el estudio WISDOM desarrollado por la FAO (2019) estimó que los departamentos de Colón, Concordia y Federación producen anualmente alrededor de 33.500 toneladas¹ de aserrín y 83.000 toneladas de costaneros y despuntes. Bompadre (2025), encontró que un total de 89 aserraderos en los departamentos Federación, Concordia y Colón (52 de los cuales estaban en el departamento Concordia), generaban 710.371 toneladas de biomasa como subproductos.

No obstante, la información disponible sobre la generación efectiva, composición y destino de los residuos y subproductos producidos por los aserraderos del departamento Concordia continúa siendo limitada y se basa principalmente en estimaciones regionales o provinciales. Contar con información local actualizada resulta fundamental para dimensionar la disponibilidad de biomasa potencialmente utilizable con fines energéticos y para orientar estrategias de valorización que contribuyan al desarrollo sostenible de la cadena foresto-industrial regional.

El objetivo del presente trabajo fue cuantificar los residuos y subproductos generados por los aserraderos del departamento Concordia, caracterizando su composición, distribución y destino, con el fin de aportar información actualizada sobre la disponibilidad de biomasa potencialmente utilizable para usos energéticos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el departamento Concordia, una de las principales regiones forestales del país, caracterizada por la presencia de plantaciones de *Eucalyptus grandis* y una importante concentración de industrias de transformación mecánica de la madera.

Tomando como base censos y relevamientos anteriores, complementado con el conocimiento local de los investigadores y consultas a referentes del sector forestal e industrial de la región, se elaboró un padrón con 105 establecimientos dedicados al aserrado de madera, este padrón inicial se depuró con el criterio de que para ser considerado “aserradero” en este trabajo debía cumplir dos condiciones: 1.- transformar rollos en tablas y 2.- tener las máquinas instaladas (estuviera o no en funcionamiento al momento del relevamiento), reduciendo así a 95 establecimientos. Estos aserraderos fueron clasificados

¹ En función de que la mayor parte de datos antecedentes están expresados en toneladas métricas (t), en este trabajo se utiliza indistintamente ese término o el de megagramos (Mg).



según su escala de producción, utilizando como criterio el consumo diario de materia prima expresado en toneladas de rollizos procesados por día. Se definieron cuatro categorías:

Categoría I: menos de 20 Mg.día⁻¹ de rollizos.

Categoría II: entre 20 y 39,9 Mg.día⁻¹ de rollizos.

Categoría III: entre 40 y 59,9 Mg.día⁻¹ de rollizos.

Categoría IV: 60 Mg.día⁻¹ o más de rollizos.

Adicionalmente, dentro de cada categoría los establecimientos fueron caracterizados según la presencia y funcionamiento de chipera y remanufactura en el mismo predio, elementos relevantes en la generación y destino de los subproductos. Sobre la base de la clasificación obtenida se implementó un muestreo estratificado, seleccionándose aleatoriamente un mínimo de 20 % de los establecimientos perteneciente a cada estrato definido por la combinación de categoría de tamaño y características operativas. Posteriormente se realizó una extrapolación ponderada al universo de establecimientos de cada estrato.

Los establecimientos seleccionados fueron visitados por integrantes del equipo de investigación. Durante cada visita se realizaron entrevistas semiestructuradas a propietarios, encargados o responsables de producción, complementadas con observaciones directas de las instalaciones y de los procesos productivos. Para cada establecimiento relevado se registraron las siguientes variables: a) Proporción de la capacidad instalada en uso; b) consumo diario de materia prima (Mg de rollizos por día); c) producción de madera aserrada (tablas); d) generación de costaneros; e) generación de chips; f) generación de aserrín; g) generación de despuntes; h) generación de viruta y i) aserrín del reprocesado. Las respuestas recibidas en diferentes unidades (de volumen, de masa, de peso, por equipos, por batea, etc.) fueron todas convertidas por su equivalencia a megagramos (Mg) o toneladas (t) -que a los efectos de este trabajo se utilizan indistintamente- por día. Los porcentajes se estimaron sobre esta unidad. Asimismo, se relevó el destino de los distintos residuos y subproductos generados.

Los datos obtenidos en los establecimientos relevados fueron procesados por estrato, calculándose valores medios de producción y generación de residuos y subproductos para cada categoría analizada. Posteriormente, dichos valores se extrapolaron al universo de aserraderos, considerando la cantidad total de establecimientos pertenecientes a cada estrato. A partir de esta metodología se estimó la generación total de residuos y subproductos de aserradero a escala departamental, discriminando los principales tipos de materiales generados y sus destinos predominantes, así como la disponibilidad de biomasa residual potencialmente utilizable con fines energéticos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el departamento Concordia se identificaron 95 aserraderos, que fueron relevados entre 2025 y 2026. Como parte de la actualización realizada en abril y junio de 2026, se verificó el estado operativo de cada industria, constatándose que 23 establecimientos (24,2 %) habían cesado su actividad en los últimos 18 meses. No obstante, en la mayoría de los casos las instalaciones se encontraban en condiciones de reanudar la producción si el mercado se activara. En conjunto, estos establecimientos “parados” representan aproximadamente el 20 % del consumo potencial de rollizos, menor que la proporción numérica ya que pertenecen a los grupos de menor consumo (16 de los 23 aserraderos parados pertenecen a las categorías I y II (menos de 39,9 Mg.día⁻¹ de rollizos).

A esa capacidad ociosa, se le debe sumar que aún dentro de los aserraderos activos sólo unos pocos utilizan una alta proporción de su capacidad instalada. En junio de 2026, sobre una muestra de los aserraderos activos (n = 33 sobre el total de 72) se determinó que la utilización promedio de la capacidad instalada fue del 60 % aproximadamente. Extrapolando este valor al resto de los establecimientos activos se estima que la capacidad instalada efectivamente utilizada en el conjunto del departamento alcanzó aproximadamente el 47,8%, o sea que hay una capacidad ociosa mayor al 52 %.

Respecto a la distribución de aserraderos por tamaño según capacidad instalada, la mayor proporción correspondió a la Categoría III (40–59,9 Mg.día⁻¹), que reunió 39 establecimientos (41 % del total). Las categorías I y II representaron el 21 % y 19 % de los aserraderos, respectivamente, mientras que la



Categoría IV ($\geq 60 \text{ Mg} \cdot \text{día}^{-1}$) el 19 % (18 aserraderos). La tabla 1 muestra como participa cada categoría en el consumo de rollizos.

Tabla 1. Capacidad instalada en el departamento Concordia, su distribución según nivel de consumo de rollizos y cantidad de aserraderos parados en el último año

Categoría de tamaño	Consumo diario de rollizos ($\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$)	Aserraderos (n)	Aserraderos (%)	Consumo total ($\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$)	Participación en el consumo (%)	Cantidad de "parados" en 2025/26
I	< 20	20	21,1	317	6,7	5
II	20–39,9	18	18,9	579	12,3	7
III	40–59,9	39	41,1	2026	42,9	8
IV	≥ 60	18	18,9	1802	38,2	3
Total	—	95	100,0	4723	100	23

Chips: Del total de 95 aserraderos, 15 (15,8 %) disponían de chipera en operación. No obstante, estos establecimientos concentraban una proporción mayor del procesamiento de materia prima, con un consumo conjunto equivalente a casi el 30 % del volumen total procesado en el departamento —que se eleva a casi 38% si se consideran sólo los aserraderos que están operando en junio de 2026-. Ello ocurre debido a que la incorporación de este proceso se encuentra asociada principalmente a establecimientos de mayor escala productiva. Además de los 15 aserraderos que producían sus chips, se relevaron 4 que teniendo chipera instalada no la estaban operando porque no les resultaba económicamente conveniente (costo de energía alto, precio de venta bajo). Dentro de los que no tienen chipera o no la usan, 37 vendían sus costaneros a terceros que los procesaban a chip. Sumando entonces todos los costaneros que se transforman en chip en instalación propia o de terceros, un 55% de los aserraderos que representan un 72 % del consumo de rollos del departamento destinaban sus costaneros a chip. Los chips en general son destinados a otras industrias como tableros y celulosa y para uso energético propio y de otras cadenas como avicultura. Debe considerarse entonces que aún alrededor del 28% de los costaneros producidos en el departamento se tratan como residuos (Tabla 2).

Tabla 2. Generación de subproductos y residuos de aserraderos del departamento Concordia en función de categorías de tamaño.

Categoría de tamaño	Consumo rollizos ($\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$)	Costaneros $\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$ (%) [*]	Chips prod. propia ^{**} $\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$ (%) [*]	Aserrín + viruta $\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$ (%) [*]	Despunte $\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$ (%) [*]
I (<20 $\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$)	317	82 (25,8)		45 (14,2)	16 (5,0)
II (20–39,9 $\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$)	579	147 (25,4)		69 (12,0)	29 (5,0)
III (40–59,9 $\text{Mg} \cdot \text{día}^{-1}$)	2.026	466 (22,3)	125 (6,2)	276 (13,6)	90 (4,4)
IV ($\geq 60 \text{ Mg} \cdot \text{día}^{-1}$)	1.802	196 (11,2)	339 (18,8)	277 (15,4)	43 (2,4)
Total	4.723	890 (18,8)	463 (9,8)	667 (14,1)	178 (3,7)

^{*} Los porcentajes entre paréntesis corresponden a la producción de cada subproducto respecto al consumo de rollizos de la categoría (o del total, en la última fila).

^{**} Para los chips de producción propia (elaborados en el mismo aserradero), se utilizan fundamentalmente costaneros y parte de los despuntes, que no están computados en las columnas costaneros ni despuntes.

Aserrín: Para este trabajo se lo computó sumado a la viruta que representó una proporción mínima sólo existente en aserraderos con reprocesamiento en los que se mezclaba con el aserrín de esa etapa y si bien constituyen un subproducto de particular interés por su bajo contenido de humedad, al ser cantidades menores y no encontrarse los datos fácilmente separables, se trataron como un todo. Esta fracción (aserrín + viruta) representó el 14 % del total de biomasa procesada (rollizos) y se determinó como la que menos proporción de lo generado termina siendo residuo. El 70 % de los aserraderos, que concentran aproximadamente el 77 % del consumo de rollizos, comercializa este subproducto hacia industrias de tableros, establecimientos avícolas, intermediarios u otros destinos productivos.

Despuntes: es el tipo de residuo que menor proporción representa. Se estima entre 4 y 5 % del volumen de rollos que ingresa al aserradero y sólo una pequeña fracción es utilizada en los casos que se cuenta con chipera propia, el resto es dispuesto en pilas de mezclas de restos que puede regalarse (sobre todo en invierno en que pobladores cercanos solicitan para calefacción) o termina quemándose o disponiéndose en volcaderos. Siendo entonces aún una fracción menor que suma alrededor de 178 t/día,



resulta interesante ya que no tiene circuitos de valorización y constituye en más del 90% de los casos, residuos que traen otros inconvenientes y costos, como riesgos de incendios, infracciones por quemas y/o costos de retiro y disposición final. La situación de estos residuos industriales contrasta con la que enfrentan los residuos de cosecha forestal, cuya extracción está condicionada por los costos logísticos de recolección y por la necesidad de preservar parte de la biomasa en el sitio para mantener el ciclo de nutrientes y la productividad de las plantaciones (Goya et al., 2009). Los residuos y subproductos de aserradero, al concentrarse en playas de acopio y establecimientos industriales, no presentan estas restricciones ambientales y ya cuentan, en su mayoría, con canales de comercialización consolidados, lo que reduce sensiblemente los costos de acceso.

Estos resultados evidencian un considerable grado de utilización de la biomasa generada por los aserraderos, aunque, aparentemente sin un alto valor. Tanto los costaneros como el aserrín constituyen, en la mayoría de los casos, subproductos comercializables más que residuos, integrándose a cadenas de valor vinculadas a la producción de chips, tableros, pasta celulósica, bioenergía y otros usos industriales. Es importante destacar que los relevamientos se realizaron en meses de una profunda crisis del sector, prácticamente sin antecedentes en su magnitud, como se refleja en el alto número de aserraderos que debieron paralizar su producción y en la baja proporción de uso de la capacidad instalada de los activos.

Este proyecto permitió, además de los resultados aquí presentados, geolocalizar los generadores, tipo y cantidad de residuos y con ello armar un sistema de información geográfica que pueda actualizarse en un futuro y ser sometido a consultas que aporten en la rama de la logística.

4. LITERATURA CITADA

- BOMPADRE, A. 2025. Estudio complementario - Consultoría individual para evaluar el potencial de reaprovechamiento de los residuos foresto-industriales en los departamentos de Federación, Concordia y Colón (Código SEPA PDIRSG-292-3CV-CI-1.11.09). Programa de Desarrollo e Integración de la Región de Salto Grande; Préstamo BID 4688-OC-RG.
- BON, W.; PIETRANTUENO, J. 2018. Análisis de factibilidad del aprovechamiento de restos de tala rasa de *Eucalyptus grandis*. Seminario final de grado de Lic. en Adm. Rural. UTN Concordia.
- BRIONES, M.V. 2009. Adaptación de una metodología para la cuantificación de residuos de la cosecha en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en la región del NEA. Tesis de grado, Fac. de Cs. Agrarias y Forestales UNLP.
- DIRECCIÓN GENERAL DE ESTADÍSTICAS Y CENSOS DE E.R. 2021. Informe del Sector Forestal, Entre Ríos. Ministerio de Economía Hacienda y Finanzas de la Provincia de Entre Ríos. Disponible en línea en: <https://www.entrerios.gov.ar/dgec/wp-content/uploads/2022/12/Informe-forestal-2021.pdf>
- FAO. 2009. Análisis del Balance de Energía Derivada de Biomasa en Argentina. WISDOM Argentina. Informe Final. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Departamento Forestal Servicios y Productos Forestales – Dendroenergía. Mayo 2009.
- GOYA, J.; FRANGI, J.; DENEGRÍ, G.; LAROCCA, F. 2009. Simulación del impacto de diferentes regímenes de cosecha sobre el capital de nutrientes e indicadores económicos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. AUGMDOMUS, 1:1-17. Asociación de Universidades Grupo Montevideo ISSN:1852-2181.
- LAROCCA, F.; FINK, G.; TESÓN, N. 2021. Evaluación de restos de cosecha forestal potencialmente utilizables para generación de energía en el Noreste de Entre Ríos. En Actas de Jornadas de Ciencia y Tecnología 2021, UTN Concordia.
- MINISTERIO DE AGROINDUSTRIA. 2017. Censo nacional de aserraderos. Informe del relevamiento censal en la provincia de Entre Ríos, región mesopotámica. Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación Argentina.
- MOREL, I. 2012. Aprovechamiento económico-ambiental sustentable de los residuos forestales de la provincia de Entre Ríos. Seminario Final de Lic. en Adm. Rural. UTN Concordia.
- RIEGELHAUPT, E. 1987. Madera para Energía. Consideraciones Técnico-Económicas sobre la producción de Combustibles Forestales en Entre Ríos. En: actas de las II Jornadas Forestales de Entre Ríos. INTA-AIANER
- SEIXAS, F. 2008. Exploración de residuos de cosecha forestal para producción de energía. En XXIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. INTA Concordia.



LA PARADOJA DEL CARBÓN VEGETAL: CÓMO LAS POLÍTICAS FORESTALES NACIONALES Y LA INTEGRACIÓN VERTICAL MOLDEAN EL MERCADO GLOBAL DEL ACERO VERDE

Jorge Antonio de FARIAS¹, Kauani Pereira da ROSA², Ana Elisa Souza IOP³

RESUMEN

Este artículo investiga la hipótesis de que la baja participación de Brasil en la exportación de biomasa carbonizada, pese a ser el líder en la producción mundial, no se atribuye a la ineficiencia del mercado, sino que representa una estrategia exitosa para internalizar activos ambientales a través de la integración vertical. Al retener el carbono a nivel nacional para reemplazar el coque fósil importado en la producción de acero, el país convierte un producto forestal primario en un motor crítico de diferenciación industrial: el acero verde. Utilizando un análisis macroeconómico de datos de FAOSTAT, ITTO y la World Steel Association, evaluamos cómo las políticas nacionales de uso de la tierra y la integración industrial determinan la intensidad de carbono. La ruta de biorreducción biogénica logra emisiones de 0,4 a 0,6 t CO₂ por tonelada de acero, en contraste con las 2,2 a 2,5 t CO₂/t en matrices dominadas por el coque como la de China. Concluimos que tratar el carbono de las plantas industriales como una Tecnología de Emisiones Negativas (NET) dentro de las políticas macroforestales ofrece un marco replicable para naciones ricas en recursos que buscan escapar de la trampa de las *commodities* primarias mientras descarbonizan sus industrias pesadas.

Palabras clave: *biorreducción, bioeconomía circular, política forestal, silvicultura comercial, huella de carbono*

1. INTRODUCCIÓN

El debate global sobre la transición energética y la descarbonización industrial ha reposicionado a los productos forestales, pasando de ser meras fuentes de energía térmica a convertirse en componentes críticos de las cadenas de valor de bajo carbono. En este contexto, el carbón vegetal se analiza históricamente bajo una óptica limitada: ya sea como un motor de la degradación forestal en economías en desarrollo o como un combustible rudimentario para la cocción residencial. Sin embargo, las arquitecturas comerciales internacionales y las políticas forestales nacionales crean vías de desarrollo divergentes para la utilización de la biomasa.

El mercado internacional revela una marcada asimetría estructural. Mientras que varios de los principales productores exportan proporciones significativas de su biomasa carbonizada como *commodity* cruda, aspecto evidenciado por los datos de comercio internacional analizados en este estudio, Brasil, el mayor productor mundial de carbón vegetal, retiene casi la totalidad de su producción dentro de sus fronteras nacionales, especialmente el sector siderúrgico, lo que se traduce en una menor participación en el comercio internacional del producto (Silva et al., 2024). Este artículo explora los factores subyacentes de esta "paradoja del carbón vegetal". Sostenemos que la retención de la biomasa forestal es un mecanismo deliberado de integración vertical que internaliza los beneficios del secuestro de carbono, permitiendo al país exportar "acero verde" de alto valor agregado en lugar de productos madereros primarios. Al examinar las dinámicas de suministro global, las huellas de carbono

¹ Profesor adjunto en el Departamento de Ciencias Forestales de la Universidad Federal de Santa María. Contacto: fariasufsm@gmail.com /telefone 51 9997-1597

² Académico en la carrera de Ingeniería Forestal en la Universidad Federal de Santa María. Contacto: kauani.rosa@acad.ufsm.br /telefone 55 99173-5199

³ Doctoranda en el Programa de Posgrado en Ingeniería Forestal de la Universidad Federal de Santa María. Contacto: ana.pereira@acad.ufsm.br /telefone 55 98120-6111



por país de origen y las interfaces tecnológicas entre la silvicultura y la metalurgia, este estudio redefine el papel del carbón vegetal industrial en la política forestal moderna y la gobernanza climática.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio utiliza un marco macroeconómico e industrial para analizar el comercio internacional de carbón vegetal y sus implicaciones ambientales. La recopilación de datos se dividió en dos módulos principales:

1. Biomasa y flujos comerciales: Los volúmenes nacionales de producción, exportación e importación se consolidaron a partir de la Base de Datos Estadísticos Corporativos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAOSTAT Forestry) y de la Revisión Bienal de la Organización Internacional de las Maderas Tropicales (ITTO).
2. Intensidad de carbono y siderurgia: Los factores relativos a la huella de carbono del carbón vegetal por origen y la intensidad de gases de efecto invernadero (GEI) de las rutas siderúrgicas (t CO₂ / t acero) se compilaron de la World Steel Association, el Instituto Aço Brasil y las directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

La retención doméstica de biomasa se modeló matemáticamente utilizando el indicador de consumo aparente (Ca) (Ecuación 1):

Ecuación [1]: $Ca = P + I - E$

Donde P es la producción nacional, I representa las importaciones totales y E corresponde a las exportaciones totales. Los modelos de gobernanza del uso de la tierra se categorizaron en tres paradigmas según el origen de la biomasa — silvicultura dedicada, especies invasoras/residuos y extracción nativa no gestionada — para evaluar su impacto neto en la política climática global.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Desconexiones entre el suministro global y los flujos comerciales

La distribución global de la producción de carbón vegetal no se correlaciona linealmente con los volúmenes del comercio internacional, lo que establece las bases de la paradoja. Como se consolidó, los principales productores están dominados por naciones que utilizan la biomasa para la energía doméstica o la industria pesada localizada:

- Brasil: 6.300.000 toneladas/año (líder absoluto; enfoque industrial)
- Etiopía: 5.100.000 toneladas/año (orientado a la cocción y el uso doméstico)
- Nigeria: 4.800.000 toneladas/año (destinado al alto consumo doméstico y comercio regional).

Sin embargo, al analizar las dinámicas de exportación, la jerarquía cambia por completo. Indonesia lidera las exportaciones globales con 520.000 toneladas/año, seguida por Vietnam con 480.000 toneladas/año. Brasil cae a la novena posición global, exportando un volumen marginal de 180.000 toneladas/año, compuesto principalmente por finos de carbón vegetal (*moinha*) y carbón activado.

Al aplicar la fórmula del consumo aparente a Brasil, se demuestra que el consumo aparente representa aproximadamente el 97,2 % de su producción total. La biomasa se canaliza sistemáticamente hacia el sector metalúrgico nacional, actuando como un agente reductor renovable en los altos hornos para sustituir el carbón fósil importado (coque).

3.2 Geopolítica de la biomasa y huellas de carbono

La validez ambiental del carbón vegetal como herramienta de mitigación depende en gran medida de la política de uso de la tierra que regula su materia prima. Datos del IPCC y de la Iniciativa Internacional del Biochar (IBI) revelan tres perfiles distintos de intensidad de carbono entre los principales actores globales:

1. Huella negativa (Remociones): Naciones como Namibia (-1,8 a -0,5 kg CO₂eq / kg carbón) y Cuba emplean la producción de carbón vegetal como una herramienta de restauración ecológica, cosechando especies leñosas invasoras (Encapsulated Bush y Marabú, respectivamente) para



recuperar pastizales naturales. Indonesia aprovecha la circularidad agrícola utilizando cáscaras de coco (0,0 a 0,2 kg CO₂eq / kg carbón).

2. Huella baja a neutra: Los modelos de Brasil y Vietnam se basan en la silvicultura comercial dedicada a plantaciones de rápido crecimiento (*Eucalyptus* spp. y *Acacia* spp., respectivamente). El carbono emitido durante la carbonización industrial es recapturado en el siguiente ciclo de rotación forestal, lo que resulta en una baja intensidad neta de 0,1 a 0,4 kg CO₂eq / kg carbón.

3. Altísima emisión (Emisores netos): En regiones de África subsahariana, como Nigeria y la República Democrática del Congo, el carbón vegetal exhibe una huella de 3,5 a 5,0 kg CO₂eq / kg carbón. Al carecer de una gobernanza forestal formal, la extracción supera la regeneración natural, convirtiendo al carbón vegetal en un motor directo de la deforestación neta y el agotamiento permanente de las reservas de carbono biótico.

3.3 La interfaz siderúrgica: la integración vertical como creación de valor

La estrategia de retener internamente el carbón vegetal de baja huella de carbono permite a Brasil transferir la eficiencia de su sector forestal directamente a su cadena de manufactura industrial.

[Producción de biomasa: Plantaciones de eucalipto]

↓ (Secuestro de carbono)

[Carbonización industrial: Carbón vegetal]

↓ (97,2 % de retención doméstica)

[Altos hornos de biorreducción: Sustitución de coque fósil]



[Producción de acero verde: 0,4 - 0,6 t CO₂ / t acero]

Al contrastar este modelo con las rutas globales convencionales de fabricación de acero, que dependen en gran medida del carbón fósil (coque), la ventaja tecnológica de la integración vertical basada en la biomasa resulta evidente, como se puede observar en lo Cuadro 1.

Cuadro 1. Comparación entre las rutas convencionales de producción de acero a nivel mundial y la ventaja tecnológica de la integración vertical basada en biomasa.

País/Región	Fuente Semillera	Intensidad Carbono (t CO ₂ / t acero)
Brasil (Biorreducción)	Carbón vegetal (Bosques plantados)	0,4 a 0,6
Unión Europea	Mix (Carbón fósil + Chatarra/Eléctrico)	1,4 a 1,8
Estados Unidos	Mix (Carbón fósil + Gas natural)	1,6 a 2,0
China	Carbón fósil (Coque)	2,2 a 2,5

Operar mediante una silvicultura dedicada permite la producción de acero con una intensidad de emisiones de tres a cuatro veces menor que la de los Estados Unidos o la Unión Europea, y hasta cinco veces menor que la infraestructura de China, que depende fuertemente de los combustibles fósiles.

3.4 Implicaciones de política pública

Las dinámicas estructurales identificadas en este artículo conllevan implicaciones significativas para las políticas internacionales de comercio y clima:

- Mitigación de la fuga de carbono (*Carbon Leakage*): Las economías desarrolladas frecuentemente implementan leyes estrictas de conservación doméstica mientras importan carbón vegetal de regiones con débil gobernanza forestal. Este proceso externaliza efectivamente la degradación forestal.



- Protección contra ajustes fronterizos: La integración vertical de Brasil proporciona un modelo para navegar las barreras comerciales ambientales emergentes, como el Mecanismo de Ajuste en Frontera por Carbono (CBAM) de la Unión Europea (European Commission, 2026). Al integrar el activo forestal directamente en los bienes industriales exportados (acero) en lugar de exportar carbón vegetal crudo, el sector industrial evita los aranceles fronterizos por carbono.
- Estatus regulatorio del carbón vegetal: Los marcos globales de contabilidad de carbono deben diferenciar entre la leña no gestionada y el carbón vegetal industrial derivado de plantaciones certificadas de rotación corta. Cuando se produce a partir de biomasa proveniente de manejo forestal sustentable y destinada a aplicaciones de larga duración o sustitución de combustibles fósiles, el carbón vegetal puede ser encuadrado como un mecanismo de Captura y almacenamiento de Carbono Pirogénico (PyCCS), siendo reconocido como una Tecnología de Emisión Negativa (NET) debido a la estabilización del carbono biogénico en formas recalcitrantes (Schmidt et al., 2019).

4. CONCLUSIONES

La "paradoja del carbón vegetal" demuestra que el bajo volumen de exportación de un commodity forestal primario por parte de un país puede indicar una avanzada verticalización industrial en lugar de una falta de competitividad comercial. La retención doméstica del 97,2% de la producción de carbón vegetal en Brasil sirve como un vínculo estratégico entre la silvicultura de ingeniería de alto rendimiento y la metalurgia de bajo carbono. Esta integración estructural permite al país exportar productos industriales con mitigación de carbono (acero verde) en lugar de biomasa primaria. Para las naciones en desarrollo ricas en recursos, este modelo ofrece un camino para escapar de la trampa de las commodities primarias, ilustrando cómo las políticas forestales domésticas pueden impulsar la descarbonización de las industrias pesadas globales.

5. LITERATURA CITADA

- EUROPEAN COMMISSION, 2026. Carbon Border Adjustment Mechanism. Brussels: European Commission, [s.d.]. Disponible en: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en. Verificado el 20/05/2026.
- FAO. 2024. FAOSTAT: Forestry Production and Trade. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. Disponible en: <https://www.fao.org/faostat/>. Verificado el 06/04/2026.
- IBI- International Biochar Initiative, 2026. Biochar as a Diversified Carbon Dioxide Removal Pathway: Research and Technology Integration Update (2023–2025). Verificado el 10/05/2026.
- INSTITUTO AÇO BRASIL. 2024. Relatório de Sustentabilidade e Dados do Setor Siderúrgico. Rio de Janeiro, RJ. Verificado el 08/05/2026.
- IPCC. 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change. Ginebra. Verificado el 10/05/2026.
- ITTO. 2024. Biennial Review and Assessment of the World Timber Situation 2023-2024. International Tropical Timber Organization. Yokohama. Disponible en: https://www.itto.int/biennial_review/.
- SCHMIDT, H.-P., ANCA-COUCÉ, A., HAGEMANN, N., WERNER, C., GERTEN, D., LUCHT, W., & KAMMANN, C. (2019). Pyrogenic carbon capture and storage (PyCCS). GCB Bioenergy, 11(4), 573–591. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12553>
- SILVA, S. A., VENTURINI, O. J., LEME, M. M. V., MOURA, D. C., & HECK, T. O. (2024). Enhancing sustainability in charcoal production: Integrated Life Cycle Assessment and by-product utilization to promote circular systems and minimize energy loss. Biomass and Bioenergy, 182, 107115. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107115>.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. 2024. World Steel in Figures 2024. Bruselas, Bélgica. Disponible en: <https://worldsteel.org/>.



DESAFÍOS DE LA LOGÍSTICA FORESTAL DE LA REGIÓN DE SALTO GRANDE Y OPORTUNIDADES DE LA INDUSTRIA 4.0: UNA EXPLORACIÓN BASADA EN ENTREVISTAS

Gonzalo Joaquín VELASCO MAZURIER¹, Carlos María CHEZZI², Dolores SIMÓN³, Luciana PIERINI⁴, Delfina RUIZ DIAZ⁵, Felipe CASAÑAS⁶

RESUMEN

La logística forestal desempeña un papel estratégico en la competitividad de la cadena foresto industrial, enfrentando desafíos tecnológicos y de gestión que exigen una mayor capacidad de adaptación y respuesta ante escenarios de negocio cada vez más dinámicos. En este contexto, surge la necesidad de comprender las principales problemáticas que condicionan el desempeño logístico regional como base para orientar procesos de transformación e innovación. Por ello, con este trabajo se propone identificar los desafíos asociados a la gestión tradicional y contribuir al análisis para una transición hacia enfoques sistémicos basados en modelos de negocios innovadores con tecnologías de Industria 4.0. Se desarrolla una investigación cualitativa basada en seis entrevistas semiestructuradas a actores representativos del sector forestal de la región de Salto Grande. Los resultados evidencian que la logística forestal regional requiere avanzar hacia un modelo de gestión basado en datos, con integración de procesos y digitalización, reconociendo a las tecnologías de Industria 4.0 como un factor habilitador de esta transformación.

Palabras clave: *logística forestal, transformación digital, análisis cualitativo, tecnologías 4.0.*

1. INTRODUCCIÓN

La logística constituye un factor estratégico para la competitividad de la cadena foresto industrial, debido a su incidencia en los costos, la eficiencia operativa y el cumplimiento de los compromisos comerciales. Según Paladino et al. (2023), las provincias de Misiones, Corrientes y Entre Ríos, región forestal considerada para el presente trabajo, concentran el 92% de la producción de madera comercial en Argentina, caracterizadas por un entramado empresarial heterogéneo vinculado a diferentes cadenas de negocio. De la observación de las problemáticas actuales de la región litoral, los autores señalan la falta de información integrada para proyectar, planificar y coordinar las operaciones de los negocios forestales, una limitada disponibilidad de información estratégica, el uso de tecnologías obsoletas, un elevado grado de informalidad y exigencias de reconversión de procesos por la apertura comercial.

La cadena de suministro de la industria forestal está conformada por un conjunto de actividades que incluyen el manejo del bosque, la cosecha, el transporte, el abastecimiento de materia prima y su transformación industrial, involucrando múltiples actores que agregan valor en las distintas etapas del proceso productivo. La articulación de estas actividades requiere la coordinación de decisiones entre los niveles estratégico, táctico y operativo, cuya complejidad e incertidumbre demandan la evolución desde modelos de negocio rígidos hacia enfoques más flexibles, resilientes y adaptativos (Baghizadeh et al., 2021). Para este proceso de cambio es fundamental pensar en soluciones tecnológicas con innovación acordes con la realidad regional.

¹ Facultad Regional Concordia, UTN, gonzavelasco99@gmail.com.

² Facultad Regional Concordia, UTN, carlos_chezzi@frcon.utn.edu.ar.

³ Facultad Regional Concordia, UTN, doloressimon26@gmail.com.

⁴ Facultad Regional Concordia, UTN, lpierini5@gmail.com.

⁵ Facultad Regional Concordia, UTN, delfinaruizdiaz51@gmail.com.

⁶ Facultad Regional Concordia, UTN, felipe.casanias@gmail.com.



La Logística Forestal 4.0 puede definirse como la integración de tecnologías digitales, sistemas inteligentes y modelos de gestión basados en datos para planificar, ejecutar, monitorear y optimizar el flujo de madera, biomasa e información desde el bosque hasta la industria, en tiempo real y con criterios de eficiencia, sostenibilidad y trazabilidad (Damaševičius et al., 2024). La Industria 4.0 es un paradigma que plantea la integración de diversas tecnologías para mejorar la eficiencia, la flexibilidad, el monitoreo y el control de los procesos empresariales (Campos et al., 2024).

Por ello en este trabajo se propone identificar los principales desafíos asociados a la gestión de la logística forestal regional y contribuir con información y recursos tecnológicos como marco de análisis para la factibilidad de la transición de modelos tradicionales hacia enfoques sistémicos basados en modelos de negocios innovadores con tecnologías de Industria 4.0. En el desarrollo del trabajo se presenta un análisis de las principales problemáticas que afectan la logística forestal regional, se describe la metodología aplicada para su identificación y se examinan las oportunidades de transformación digital mediante tecnologías de Industria 4.0.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se inició con una etapa de diagnóstico destinada a identificar las principales problemáticas de la logística foresto industrial de la región de Salto Grande a partir de la experiencia y el conocimiento de los actores involucrados en los diferentes eslabones de la cadena de valor. Para ello se propuso una estrategia de recolección de información primaria basada en entrevistas individuales semiestructuradas, procurando mantener una cobertura temática común entre participantes y, al mismo tiempo, profundizar en experiencias, interpretaciones y situaciones emergentes durante la conversación. Su duración aproximada fue de 40 minutos y el registro de las mismas fue mediante grabación de audio, previo consentimiento informado de las partes. El diseño metodológico se sustentó en un enfoque cualitativo de alcance exploratorio, orientado a caracterizar las prácticas de planificación, coordinación, gestión de información y toma de decisiones. La elección de dicho enfoque respondió a la necesidad de recuperar conocimientos situados, procedimientos informales, criterios tácitos de decisión y problemáticas operativas que no podían ser precisadas adecuadamente mediante información documental o indicadores cuantitativos exclusivamente.

La selección de los entrevistados se realizó en base a una técnica de muestreo intencional por criterios, procurando obtener variación funcional y cobertura de los principales eslabones, interfaces y funciones de soporte de la cadena logística forestal. Los criterios de selección fueron trayectoria de la empresa en el sector, cantidad de empleados vinculados a la operación y grado de formalidad. Para el estudio se diferenciaron dos grupos: actores directos de la cadena de valor y actores de soporte. El primer grupo comprendió funciones vinculadas con plantaciones, cosecha, transporte, recepción industrial, inventarios, producción, comercialización y exportación y el segundo reunió organismos, proveedores y referentes capaces de aportar información sobre regulación, tecnología, condiciones hidrometeorológicas y articulación sectorial. Los actores directos entrevistados fueron cuatro, mientras que los actores de soporte fueron dos.

La guía fue estructurada alrededor de seis ejes: exploración inicial, coordinación, decisiones críticas, datos, ejemplificación de situaciones problemáticas y expectativas respecto de posibles soluciones. Estos ejes se derivan de los objetivos de la investigación y de la revisión conceptual sobre logística forestal, gestión basada en datos y transformación digital, con la realización de seis entrevistas, entre mayo y junio de 2026. El procesamiento de la información se realizó mediante un análisis del contenido temático con un enfoque de codificación deductivo e inductivo, en base al siguiente procedimiento: (i) lectura exhaustiva de las entrevistas, (ii) elaboración de un resumen extendido de los aspectos observados y sus problemáticas, (iii) codificación deductiva a partir de las categorías previamente definidas según los ejes de la entrevista: planificación, coordinación, gestión de la información, toma de decisiones, logística, tecnología, (iv) codificación inductiva e identificación de temas emergentes que aparecen repetidamente en los discursos y que no estaban definidos inicialmente e (v) informe final con las categorías temáticas, los códigos asociados a cada categoría y un análisis entre problemas y oportunidades.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis del contenido permitió consolidar los resultados en seis categorías temáticas, construidas a partir de la combinación de categorías deductivas definidas previamente y categorías inductivas emergentes del discurso de los entrevistados. Cada una agrupa los códigos identificados durante el proceso y representa un eje de análisis que refleja las principales problemáticas, necesidades y oportunidades para la evolución de la logística forestal regional. En la siguiente descripción se presentan las categorías temáticas, los códigos asociados y el análisis de cada una de ellas:

Categoría 1: *Cambio del modelo de gestión* (inductiva).

Códigos: Gestión reactiva. Gestión predictiva. Continuidad operativa. Métricas de tecnología, productividad y rentabilidad. Inteligencia de negocios. Analítica predictiva.

Análisis de la categoría: las decisiones se adoptan en función de la experiencia de los responsables y de la exigencia de garantizar la continuidad operativa. Se plantea la necesidad de evolucionar hacia modelos de gestión apoyados en datos, con capacidades predictivas y de integración entre la información operativa, logística, económica y financiera. Asimismo, se requiere generar métricas que evidencien el impacto económico y la rentabilidad derivados de la implementación de tecnologías emergentes y nuevos modelos de negocios.

Categoría 2: *Tecnologías de captura de datos, gestión de la información y soporte a la decisión gerencial* (deductiva).

Códigos: Captura manual, no sincronizada de datos. Información fragmentada. Sistemas aislados. Falta de indicadores. Gestión basada en planillas de cálculo Excel. Información económica no disponible en tiempo real. Visibilidad del flujo de caja en tiempo real. Integración operativa, económica y financiera.

Análisis de la categoría: la información se encuentra distribuida entre múltiples sistemas y planillas cálculo, dificultando la obtención de indicadores adecuados. Esta fragmentación limita la capacidad para la toma de decisiones basadas en información integrada. Se observa también la importancia de contar con plataformas interconectadas que permitan visualizar en tiempo real indicadores operativos, económicos y financieros, incluyendo el flujo de caja, los costos y la rentabilidad de las operaciones.

Categoría 3: *Integración de la cadena de valor* (inductiva).

Códigos: Integración foresto industrial. Coordinación entre empresas. Colaboración entre PyMEs. Plataformas digitales. Redes de abastecimiento. Consolidación de oferta.

Análisis de la categoría: se observa la necesidad de fortalecer la integración entre los distintos actores de la cadena de valor foresto industrial mediante plataformas colaborativas que permitan coordinar la producción y la logística. La colaboración entre PyMEs fue asociada más como una estrategia de competitividad para acceder a mercados de mayor escala que por necesidades de coordinación operativa.

Categoría 4: *Trazabilidad y digitalización de procesos* (deductiva).

Códigos: Trazabilidad por lote. Historia productiva. Captura digital de datos. Seguimiento de operaciones. Integración de información.

Análisis de la categoría: se pone de manifiesto la importancia de contar con sistemas automatizados capaces de captar, registrar y procesar, en tiempo real, la información asociada a cada lote desde la plantación hasta la industrialización. La disponibilidad de información integrada y actualizada favorece la trazabilidad de los procesos, mejora el control de la calidad y fortalece la toma de decisiones basada en datos.

Categoría 5: *Infraestructura logística y transporte* (inductiva).

Códigos: Caminos rurales. Estado de rutas. Restricciones de transporte. Automatización de camiones. Tecnologías incorporadas. Optimización logística.

Análisis de la categoría: la mala infraestructura vial fue identificada como uno de los principales condicionantes de la logística regional. A ello se suma el interés por incorporar tecnologías en los



vehículos de transporte para mejorar la eficiencia, la seguridad y la planificación de las operaciones.

Categoría 6: Planificación logística bajo incertidumbre (inductiva).

Códigos: Planificación flexible. Planificación de corto plazo. Gestión de contingencias. Anticipación de eventos climáticos. Integración de pronósticos meteorológicos. Gestión del abastecimiento. Optimización de inventarios.

Análisis de la categoría: la planificación logística se encuentra fuertemente condicionada por factores externos como las condiciones climáticas, el estado de los caminos, la disponibilidad de materia prima y las fluctuaciones del mercado de la madera. Predomina una planificación de corto plazo con frecuentes reprogramaciones de la cosecha, el transporte y el abastecimiento, lo que refleja la necesidad de incorporar herramientas predictivas que permitan anticipar escenarios y reducir la incertidumbre operativa.

Del análisis del resultado del proceso de codificación deductiva e inductiva se identifica que la principal limitación de la logística forestal es la gestión de la información y la articulación entre los actores de la cadena de valor. Las entrevistas muestran la necesidad de integrar información operativa, logística, económica y financiera como un requisito transversal para mejorar la planificación, el seguimiento de las operaciones y la toma de decisiones. Dicha integración es posible con la incorporación de plataformas tecnológicas que acompañen la gestión en tiempo real con información actualizada, lo que favorece la conformación de un entorno de toma de decisiones basado en datos con capacidades de análisis predictivo y elaboración de pronósticos como respuesta a contextos microeconómicos y macroeconómicos cambiantes. De este modo, la gestión del negocio podría evolucionar hacia un modelo flexible, con foco en la rentabilidad, la creación de valor y la sostenibilidad competitiva.

Las seis categorías identificadas representan dimensiones de cambio necesarias para la transformación de la logística forestal hacia un nuevo modelo de gestión digital. Dicho modelo se sustenta en la incorporación de tecnologías para la captura e integración de datos, la trazabilidad de la cadena de valor, la modernización de la infraestructura logística y la planificación en contextos de incertidumbre, como capacidades esenciales para mejorar la toma de decisiones y la competitividad del sector. La transformación digital es la transformación relacionada con los cambios que las tecnologías digitales pueden traer consigo al modelo de negocio de una empresa, a sus productos o a sus estructuras organizacionales (Väätäinen et al., 2026). Implica revisar el modelo de decisión de la organización, la validez de los datos, el nivel de integración entre sus áreas y actores y la rapidez con la que la organización puede aprender. Sin embargo, la adopción tecnológica sólo genera valor cuando la empresa replantea sus modelos de operación y sus estrategias organizacionales (Vărzaru y Bocean, 2024).

Con el propósito de comprender la aplicación de las tecnologías de Industria 4.0 en contextos reales de gestión forestal, se presentan y clasifican según las categorías temáticas relevadas casos de uso que ejemplifican soluciones tecnológicas y demuestran la contribución a las problemáticas identificadas en este estudio.

- Modelo de negocios innovador en silvicultura de precisión Stora Enso: con el uso de gemelos digitales, se transforma el bosque en un activo digital dinámico (<https://www.storaenso.com/en/newsroom/news/2024/5/precision-forestry>). Este caso de uso se lo toma como ejemplo de la categoría temática “Cambio del modelo de gestión” al transformar la representación y la gestión de la plantación mediante un gemelo digital construido por varias capas de información. La integración de dichas capas junto con el uso de inteligencia artificial permite reconocer especies, dimensiones de los árboles, volumen de madera, entre otras capacidades.

- Esri ArcGIS: plataforma tecnológica inteligente que unifica datos provenientes de Sistemas de Información Geográfica (SIG), IoT, drones, sensores, imágenes satelitales y aplicaciones móviles en un único entorno digital, transformando la información en tiempo real en conocimiento (<https://www.esri.com/en-us/industries/forestry/segments/managed-operations>). Se relaciona este caso de uso con la categoría temática “Tecnologías de captura de datos, gestión de la información y soporte a la decisión gerencial” por integrar información geoespacial, aplicaciones móviles y fuentes de sensado remoto para su visualización y análisis mediante mapas y tableros. Esto permite controlar operaciones,



infraestructura forestal, entregas, eficiencia de activos y desempeño de la fuerza de trabajo.

- Sistema de planificación de recursos empresariales TRACT ERP: integra los eslabones de la cadena de valor con especialización en gestión forestal, ofreciendo visibilidad continua del flujo de caja, estados de resultados y márgenes por operación (<https://gettract.com/forestry-procurement-software/>).

- Sistema de certificación forestal FSC Trace: integra blockchain, IoT y computación en la nube para registrar y verificar la trazabilidad (<https://fsc.org/es>). La categoría temática "Integración de la cadena de valor" es ejemplificada con este caso de uso. FSC Trace utiliza una cadena de bloques privada para registrar transacciones y datos de abastecimiento de forma verificable. La plataforma permite vincular productos con información sobre su origen, lugar de cosecha, especie, volumen y grupo de producto, manteniendo un registro auditable a lo largo de la cadena de suministro

4. CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados de las entrevistas se identifica que los principales desafíos de la logística forestal de la región de Salto Grande se vinculan con la fragmentación de la información, la limitada integración entre los actores de la cadena de valor y la planificación reactiva en contextos de incertidumbre. A partir de las seis categorías temáticas identificadas, el cambio de modelo de gestión como eje, capaz de integrar información proveniente de distintos procesos empresariales, representa el primer conjunto de oportunidades a capitalizar ya que permite establecer principios organizacionales que no solo permite obtener beneficios por incorporar soluciones relacionadas con los demás ejes temáticos, sino que facilitan la incorporación de las cualidades resultantes como diferenciadores de negocio en el mercado. Una vez establecida la línea base, un proceso de transformación digital puede avanzar mediante un diagnóstico progresivo de capacidades y propuesta de valor. De esta manera, la innovación empresarial se concibe como iteraciones experimentales en las cuales las tecnologías 4.0 se incorporan en función de problemas y oportunidades de negocio concretos. La integración resultante entre procesos físicos y de información constituye el punto de transición entre una organización que simplemente utiliza herramientas digitales y una organización capaz de gestionar sus operaciones mediante información integrada y confiable.

5. LITERATURA CITADA

- BAGHIZADEH, K. ZIMON, D. JUM'A, L. 2021. Modeling and Optimization Sustainable Forest Supply Chain Considering Discount in Transportation System and Supplier Selection under Uncertainty. *Forests*, 12(8), 1-29. <https://doi.org/10.3390/f12080964>.
- CAMPOS, W. FOLGADO, F. CALDERÓN, D. GONZÁLEZ, I. CALDERÓN, A. 2024. Review of Industry 4.0 from the Perspective of Automation and Supervision Systems: Definitions, Architectures and Recent Trends. *Electronics*, 13(4), 782. <https://doi.org/10.3390/electronics13040782>.
- DAMAŠEVIČIUS R. MOZGERIS G. KURTI A. MASKELIŪNAS R. 2024. Digital transformation of the future of forestry: an exploration of key concepts in the principles behind Forest 4.0. *Front. For. Glob. Change*, 7, 1-17. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1424327>.
- HE, Z., TURNER, P. 2021. A Systematic Review on Technologies and Industry 4.0 in the Forest Supply Chain: A Framework Identifying Challenges and Opportunities. *Logistics*, 5(4), 88. 1-22. <https://doi.org/10.3390/logistics5040088>.
- PALADINO, M. PIAZZARDI, B. BELTRAMINO, C. ALONSO SCHWARZ, G. CUEVAS, J. 2023. Agendas sectoriales en el marco del Programa Económico Integral, Productivo y Federal de IERAL: Sector foresto-industrial. Asociación Forestal Argentina (AFOA), 1-34. https://afoa.org.ar/wp-content/uploads/2024/01/122-Octubre-2023-Talleres-Sectoriales_Forestal-231213_171837.pdf.
- VÄÄTÄINEN, K. KOSTENSALO, J. ANTTILA, P. SAVINAINEN, M. KAAKKURIVAARA, T. POHJANKUKKA, J. SIKANEN, L. 2026. Toward a digital twin of forest roads. Road weather stations for monitoring road condition and trafficability in Eastern Finland. *International Journal of Forest Engineering*, 37(2), 211-224. <https://doi.org/10.1080/14942119.2025.2533086>.
- VÄRZARU, A. BOCEAN, C. 2024. Digital Transformation and Innovation: The Influence of Digital Technologies on Turnover from Innovation Activities and Types of Innovation. *Systems*, 12(9), 1-25. <https://doi.org/10.3390/systems12090359>.



OPTIMIZACIÓN DEL ABASTECIMIENTO DE BIOMASA FORESTAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Gabriela CORSANO^{1,2}, Yasmín LANA²

RESUMEN

En este trabajo se aborda la selección de proveedores de biomasa de origen forestal, proveniente tanto de plantaciones como de la actividad foresto-industrial, destinada a una planta de generación de energía eléctrica ubicada en el norte de la provincia de Corrientes. La planta tiene una capacidad instalada de 60 MW y recibe la biomasa de la cuenca forestal de plantaciones de *Pinus spp.* y *Eucalyptus spp.*, y de aserraderos que se encuentran a no más de 100 km de la planta. Concretamente, los bosques proveen rollizos de diferentes diámetros obtenidos de raleos y de cosechas no usadas para otras producciones (rollizos defectuosos o de baja calidad), mientras que los aserraderos proveen de chip y aserrín a la planta. Los rollizos son chipeados al ingresar a la planta y mezclado con el aserrín y los chips en un silo que posee la planta. Se presenta un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) multiperíodo, que determina el conjunto óptimo de proveedores y los volúmenes de suministro a lo largo de un horizonte anual de 12 meses, minimizando el costo total de abastecimiento. Los resultados para este caso de estudio demuestran la eficiencia computacional del enfoque y su capacidad para identificar configuraciones de abastecimiento robustas, equilibrando cercanía geográfica, estabilidad productiva, confiabilidad del suministro y costos totales de la cadena.

Palabras clave: *selección de proveedores, planificación táctica, optimización, bioenergía.*

1. INTRODUCCIÓN

La generación de energía eléctrica a partir de biomasa forestal representa una alternativa renovable de creciente relevancia en regiones con importante actividad foresto-industrial, como el Noreste Argentino (NEA). Esta región posee una extensa cuenca forestal integrada por plantaciones de *Pinus spp.* y *Eucalyptus spp.*, junto con una red de industrias de primera transformación, principalmente aserraderos, que generan residuos y subproductos aprovechables como biomasa energética: chips de madera, aserrín y rollizos de baja calidad maderera. Debido a la competencia que existe entre las distintas plantas que requieren esta biomasa, sumado a las condiciones climáticas que muchas veces impiden ingresar a los bosques y a la baja confiabilidad de ciertos proveedores por tratarse en algunos casos de un mercado informal existente, la variabilidad de la disponibilidad de estos materiales hace compleja la planificación del abastecimiento a la planta de generación que opera con demanda continua de 60.000 toneladas al mes.

Las decisiones tácticas de abastecimiento condicionan fuertemente el costo total y la estabilidad operativa del sistema. Una selección inadecuada puede derivar en interrupciones del suministro, exceso de costos de transporte o dependencia excesiva de un único actor de la cadena logística. Por este motivo, contar con herramientas formales de optimización que apoyen estas decisiones resulta de alto valor para los operadores de plantas de bioenergía.

La selección de proveedores y la gestión de contratos representan un pilar crítico para garantizar la estabilidad operativa y los enfoques basado en programación matemática han ganado terreno en la literatura reciente relativa a la cadena de suministro forestal. En este sentido, Rahimi y col. (2019) desarrollan un modelo de optimización para la selección de contratos de suministro, subrayando que la multiplicidad de proveedores y tipos de acuerdos disponibles hace que esta decisión sea demasiado compleja para el juicio humano o el uso de herramientas manuales como hojas de cálculo. Bordón y

¹ Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina. gcorsano@santafe-conicet.gov.ar

² Instituto de Desarrollo y Diseño, CONICET-UTN. Santa Fe, Argentina.



col. (2020) propusieron formulaciones de programación mixta entera lineal (MILP) para resolver de forma conjunta la asignación de materia prima, el ruteo y la programación de camiones en la industria forestal, demostrando que este tipo de modelos permite obtener soluciones de buena calidad en tiempos de cómputo razonables para instancias de tamaño realista. En la misma línea, Melchiori y col. (2022) desarrollaron un modelo basado en arcos con discretización temporal para gestionar simultáneamente el ruteo y la programación en la cadena de suministro forestal, evidenciando que la integración de decisiones de abastecimiento y logística mediante optimización matemática supera a los enfoques secuenciales tradicionales. Mesquita y col. (2022), por su parte, propusieron modelos con relajaciones lineales más ajustadas para mejorar el desempeño de los solvers comerciales de MILP en problemas de diseño de red y transporte de madera, lo que resulta relevante para escalar este tipo de herramientas a instancias con un gran número de proveedores. Basso y col. (2019) resaltaron que, más allá de la calidad matemática de las soluciones, la coordinación efectiva entre múltiples proveedores enfrenta barreras prácticas de confianza e intercambio de información, lo que refuerza la necesidad de contar con modelos formales que sistematicen la decisión de selección de proveedores en lugar de depender de acuerdos ad hoc. Finalmente, Audy y col. (2022), en su revisión de sistemas de soporte a la decisión para el transporte de madera, subrayan que los modelos de optimización siguen siendo la herramienta central para guiar decisiones de aprovisionamiento y ruteo en la industria forestal.

En este contexto, el presente trabajo plantea un modelo MILP para la planificación táctica multiperíodo del abastecimiento de biomasa forestal. El modelo es formulado de manera genérica y resuelto, mediante GAMS (General Algebraic Modeling System) utilizando el solver CPLEX, para el caso de una planta de energía eléctrica que genera 60 MWh, adoptando datos representativos del sector forestal del NEA (InFoPro, 2026). El enfoque incorpora costos de adquisición y transporte, restricciones de mezcla para garantizar una alimentación adecuada por tipo de biomasa, balance de inventario en planta y un factor de confiabilidad asociado a cada proveedor que modula su participación máxima admisible en el volumen total anual.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del problema

El problema consiste en determinar, para un horizonte de planificación de 12 períodos mensuales (t_1 – t_{12}), qué proveedores activar en cada período, cuánto volumen adquirir de cada tipo de biomasa desde cada sitio de suministro, y cómo gestionar el inventario en planta, minimizando el costo total de abastecimiento. Como se mencionó anteriormente, se consideran tres tipos de biomasa: chips, aserrín y rollizos. Los proveedores pueden operar sitios de distintos tipos: aserraderos (oferta relativamente estable) o frentes de cosecha (oferta más estacional).

2.2 Formulación matemática

A continuación, se describen los conjuntos, parámetros y variables que se utilizan en la formulación del modelo MILP.

2.2.1 Conjuntos e índices

P	: conjunto de proveedores
S	: conjunto de sitios de suministro
B	: conjunto de tipos de biomasa
T	: conjunto de períodos del horizonte
$S_p \subseteq S$	: sitios pertenecientes al proveedor p

2.2.2 Parámetros

a_{sbt} : disponibilidad máxima de biomasa tipo b en sitio s en período t
 d_t : demanda de biomasa en período t
 c_{sbt}^v : costo unitario de compra
 c_{st}^t : costo unitario de transporte
 c_p^f : costo fijo de activación del proveedor p



$\gamma_p \in [0,1]$: nivel de confiabilidad del proveedor p

$\alpha_b^{min}, \alpha_b^{max}$: proporciones mínima y máxima del tipo b en la mezcla

c_t^{inv} : costo unitario de inventario

I^{min}, I^{max} : capacidad mínima y máxima de inventario

I_0 : inventario inicial

2.2.3 Variables de decisión

$x_{sbt} \geq 0$, cantidad de biomasa tipo b adquirida en el sitio s en el período t .

$y_{pt} \in \{0,1\}$, toma 1 si el proveedor p es activado en el período t .

$I_t \geq 0$, inventario total en planta al final del período t .

$Q_{pt} \geq 0$, volumen total recibido del proveedor p en el período t .

$Q_t \geq 0$, volumen total recibido en el período t .

2.2.4 Función objetivo

La función objetivo minimiza el costo total de abastecimiento, incluyendo compra, transporte, activación de proveedores ponderada por confiabilidad, y mantenimiento de inventario. Puede observarse que el término asociado al costo de selección del proveedor tiene el coeficiente $(1 - \gamma_p)$, el cual disminuye cuando el coeficiente de confianza γ_p aumenta, “costando” menos la selección de ese proveedor.

$$\min Z = \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} \sum_{b \in B} (c_{sbt}^v + c_{st}^t) x_{sbt} + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} c_p^f (1 - \gamma_p) y_{pt} + \sum_{t \in T} c_t^{inv} I_t \quad (1)$$

2.2.5 Restricciones

A continuación, se presentan las restricciones del problema de selección de proveedores y planificación de entregas:

$$Q_{pt} = \sum_{s \in S_p} \sum_{b \in B} x_{sbt} \quad \forall p, t \quad (2)$$

$$Q_t = \sum_{p \in P} Q_{pt} \quad \forall t \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S} x_{sbt} \geq \alpha_b^{min} Q_t \quad \forall b, t \quad (4)$$

$$\sum_{s \in S} x_{sbt} \leq \alpha_b^{max} Q_t \quad \forall b, t \quad (5)$$

$$I_1 = I_0 + Q_1 - d_1 \quad (6)$$

$$I_t = I_{t-1} + Q_t - d_t \quad \forall t > 1 \quad (7)$$

$$I^{min} \leq I_t \leq I^{max} \quad \forall t \quad (8)$$

$$x_{sbt} \leq a_{sbt} \sum_{p: s \in S_p} y_{pt} \quad \forall s, b, t \quad (9)$$

$$Q_p^{tot} = \sum_{t \in T} Q_{pt} \quad \forall p \quad (10)$$

$$Q^{tot} = \sum_{t \in T} Q_t \quad (11)$$

$$Q_p^{tot} \leq \beta_p^{max} Q^{tot} \quad \forall p \quad (12)$$

$$x_{sbt} \geq 0, I_t \geq 0, Q_t \geq 0, Q_{pt} \geq 0, y_{pt} \in \{0,1\} \quad (13)$$

La ecuación (2) y (3) contabiliza la cantidad de biomasa en cada período provista por el proveedor p y por todos los proveedores, respectivamente. Las restricciones (4) y (5) establecen la cantidad mínima y máxima de cada tipo de biomasa que debe recibir la planta en cada período para asegurar una mezcla balanceada de materiales, garantizar la eficiencia energética y evitar ensuciamiento de las calderas por exceso de aserrín. Para el caso de los rollizos, se considera el chipeado de éstos en el coeficiente α correspondiente. Las ecuaciones (6) y (7) describen el inventario para el período inicial y los siguientes, respectivamente, mientras que la restricción (8) acota la capacidad de inventario, asegurando el stock de seguridad (I^{min}). La restricción (9) describe la disponibilidad de cada tipo de biomasa en cada sitio s del proveedor p en cada período, y a la vez activa (o no) la compra al proveedor p en el período t (se desprende de esta restricción y la ecuación (2)). Las ecuaciones (10) y (11) definen las cantidades compradas a cada proveedor y en total en el horizonte de tiempo, mientras que la restricción (12)

establece un límite para la compra a cada proveedor dada por el porcentaje β_p^{max} de la compra total.

2.3 Caso de estudio e implementación

La instancia del caso de estudio incluye 100 proveedores potenciales, 150 sitios donde se pueden obtener 3 tipos de biomasa (rollizos, chips y aserrín) y 12 períodos mensuales, generando 8121 restricciones, 6725 variables continuas y 1200 variables binarias. En el Gráfico 1 se esquematiza mediante círculos la distribución de biomasa en los distintos sitios y disponibilidad (ton/año).

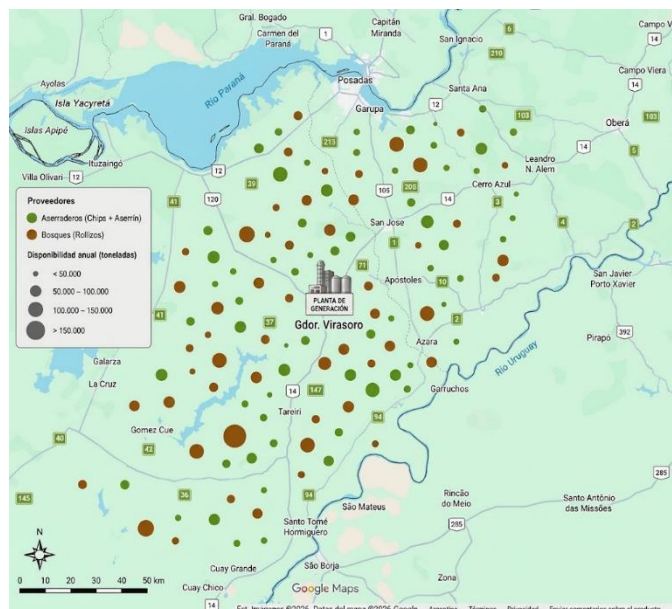


Gráfico 1. Distribución geográfica de los sitios de materia prima del ejemplo propuesto.

Para la cuota máxima de compra a cada proveedor se usó la expresión $\beta_n^{max} = 0.2 + 0.6\gamma_n$.

Para garantizar la generación continua de energía, la demanda mensual de biomasa forestal es de 60.000 toneladas, imponiendo un inventario de seguridad, $I^{min}=10.000$, la capacidad máxima $I^{max}=120.000$ y un inventario inicial, $I_0=20.000$. Por falta de espacio, no se informan otros parámetros adoptados, pero se encuentran disponibles para el lector interesado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo fue resuelto en menos de 2 segundos de tiempo de cómputo. El costo total óptimo de abastecimiento anual resultó de \$23.669.812. El Gráfico 2 (a) muestra las cantidades de cada tipo de biomasa a lo largo del año y el inventario de cada mes. Como puede observarse, las toneladas de rollizos supera ampliamente las toneladas de chip y aserrín compradas cada mes. Esto se debe a que el costo de los rollizos es menor que el de los chips (un 13% en promedio) y el aserrín tiene acotado su uso entre un 10% y un 40% de la mezcla.

En cuanto a la contratación de los proveedores, se observa una gran variedad de proveedores elegidos. El Gráfico 2 (b) describe los 10 mayores proveedores a lo largo del año y el resto, con la confiabilidad de cada uno. Como puede observarse, p50 es el mayor proveedor (26.628 t) y también el más confiable del Top 10 (conf=0,90). Sin embargo, en promedio, estos 10 proveedores tienen menor confiabilidad (70%) que el resto (74%). Esto se debe a que hay otros factores que influyen al momento de decidir sobre la selección de proveedores, como ser la disponibilidad y el costo de cada tipo de biomasa, como así también el costo fijo de contratación y la distancia del sitio de materia prima a la planta (costo de transporte).

De la optimización del modelo se puede obtener información detallada de la planificación táctica, que permite analizar situaciones particulares como la estacional de cosecha/disponibilidad de rollizos (vinculada a época de raleo o zafra forestal), o el cambio de proveedores durante épocas de lluvia donde no es confiable ingresar a ciertos bosques.

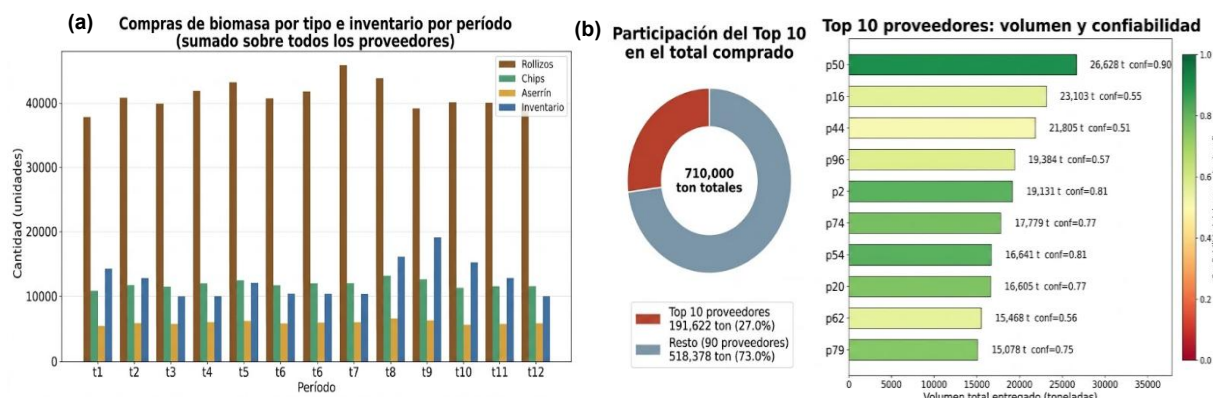


Gráfico 2. (a) Distribución de compra de biomasa e inventario y (b) concentración de proveedores y confiabilidad en la solución óptima.

4. CONCLUSIONES

El modelo propuesto representa una herramienta de optimización computacional valiosa para guiar la selección táctica de proveedores de biomasa forestal, en un problema donde la intuición o la experiencia por sí solas difícilmente podrían captar la complejidad de las decisiones involucradas. Esta herramienta permitió identificar, mes a mes, qué combinación de proveedores, sitios y tipos de biomasa minimiza el costo total de abastecimiento, revelando resultados que no son evidentes a priori. Estos hallazgos muestran que la calidad de la decisión de abastecimiento depende de resolver simultáneamente un número elevado de variables interrelacionadas (disponibilidad, costo variable, costo de transporte, costo fijo de contratación e inventario) tarea que excede la capacidad de una planificación manual o basada en reglas heurísticas simples, y que solo un enfoque de optimización matemática puede abordar de forma sistemática y reproducible.

Asimismo, el análisis comparativo entre los proveedores de mayor volumen y el resto de la cartera demostró que el modelo no está guiado por criterios simples o intuitivos, como la cercanía geográfica o el menor costo fijo de contratación, sino por la interacción compleja entre el costo variable de la biomasa, la disponibilidad de cada sitio y las restricciones de mezcla del sistema. Este tipo de resultado subraya la importancia de contar con una herramienta que permita cuantificar y visualizar el verdadero peso de cada variable en la decisión final, en lugar de asumir relaciones que podrían no cumplirse en la práctica (por ejemplo, comprar más a quien está más cerca o cuesta menos contratar).

5. LITERATURA CITADA

- AUDY, J.F.; D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; YIAHOU, A.-E. 2022. Planning methods and decision support systems in vehicle routing problems for timber transportation: a review. *International Journal of Forest Engineering* 34, 2, 143–167.
- BASSO, F.; D'AMOURS, S.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. 2019. A survey on obstacles and difficulties of practical implementation of horizontal collaboration in logistics. *International Transactions in Operational Research* 26, 775–793.
- BORDÓN, M.R.; MONTAGNA, J.M.; CORSANO, G. 2020. Mixed integer linear programming approaches for solving the raw material allocation, routing and scheduling problems in the forest industry. *International Journal of Industrial Engineering Computations* 11, 4, 525–548.
- INFOPRO, disponible en <https://infopro.misiones.gob.ar/category/precios-materia-prima/>. Verificado el 8 de Julio 2026.
- MELCHIORI, L.; NASINI, G.; MONTAGNA, J.M.; CORSANO, G. 2022. A mathematical modeling for simultaneous routing and scheduling of logging trucks in the forest supply chain. *Forest Policy and Economics* 136, 102693.
- MESQUITA, M.; MARQUES, S.; MARQUES, M.; MARTO, M.; CONSTANTINO, M.; BORGES, J.G. 2022. An optimization approach to design forest road networks and plan timber transportation. *Operational Research* 22, 3, 2973-3001.
- RAHIMI, A.; RÖNNQVIST, M.; LEBEL, L.; AUDY, J.F. 2019. An Optimization Model for Selecting Wood Supply Contracts. *Canadian Journal of Forest Research* 50, 4, 399-412.



COMPARACIÓN DE CRITERIOS DE RENDIMIENTO PARA EL CORTE ÓPTIMO DE MADERA EN ASERRADEROS

Nicolás VANZETTI¹, Gabriela CORSANO^{1,2}

RESUMEN

El sector foresto-industrial del noreste argentino (NEA) posee un importante potencial productivo que aún no se aprovecha plenamente debido, entre otros factores, a deficiencias en la planificación y gestión de los aserraderos. En este contexto, los modelos de optimización matemática constituyen una herramienta eficaz para asistir la toma de decisiones. En este trabajo se propone un sistema de soporte a las decisiones compuesto por un generador exhaustivo de patrones de corte y un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para la planificación óptima de la producción diaria. El objetivo es evaluar el desempeño del modelo mediante la aplicación de diferentes funciones objetivo representativas de distintos criterios de gestión, considerando además diversos escenarios de demanda. Los resultados muestran que el modelo responde de manera consistente a los criterios evaluados y permite analizar el impacto de cada política de producción sobre el desempeño del aserradero. Asimismo, el estudio pone de manifiesto que la selección de la función objetivo más adecuada depende del contexto operativo y de las prioridades de gestión definidas para el proceso productivo.

Palabras clave: *planificación de la producción, sistema de soporte a las decisiones, optimización matemática*

1. INTRODUCCIÓN

La industria foresto-industrial constituye uno de los principales motores económicos del noreste argentino (NEA), región donde se concentra más del 85 % de las plantaciones forestales con destino industrial del país. Particularmente en la provincia de Misiones, el entramado productivo está conformado por más de 700 establecimientos industriales, de los cuales aproximadamente el 98 % corresponde a pequeñas y medianas empresas (PyMES), representando además una fracción significativa de las exportaciones provinciales (Broz et al., 2016). No obstante, pese a la disponibilidad de recursos forestales y al crecimiento sostenido del sector, persisten importantes desafíos relacionados con la eficiencia operativa y la competitividad de los aserraderos.

Entre las principales dificultades se encuentran el aprovechamiento insuficiente de la materia prima, bajos rendimientos de conversión, elevados niveles de inventario, incumplimientos en los plazos de entrega y una limitada capacidad para adaptar la producción a las variaciones de la demanda. Estas problemáticas repercuten directamente sobre los costos de producción y la rentabilidad de las empresas, haciendo necesario incorporar herramientas que permitan mejorar los procesos de planificación y programación de la producción.

En este contexto, la optimización matemática se ha consolidado como una de las metodologías más eficaces para asistir la toma de decisiones en sistemas productivos complejos (Anderson et al., 2015). Su aplicación en la industria forestal abarca problemas de planificación estratégica, táctica y operativa, integrando decisiones relacionadas con el abastecimiento de materia prima, la producción, el almacenamiento y la distribución (Troncoso et al., 2015). Una revisión reciente de la literatura confirma que los modelos de programación matemática continúan siendo la principal herramienta cuantitativa empleada para apoyar la toma de decisiones en la cadena foresto-industrial (Mena-Reyes et al., 2024).

¹ Instituto de Desarrollo y Diseño (INGAR, CONICET-UTN). nvanzetti@santafe-conicet.gov.ar

² Facultad Ingeniería Química (FIQ), Universidad Nacional Litoral (UNL). gcorsano@santafe-conicet.gov.ar



Dentro de la cadena foresto-industrial, el aserradero representa uno de los eslabones de mayor complejidad debido a la elevada variabilidad de la materia prima y a la necesidad de satisfacer simultáneamente múltiples demandas de productos. Una de las decisiones más relevantes consiste en definir los patrones de corte que serán aplicados a cada tipo de troza. Este problema, conocido como *Cutting Stock Problem* (CSP), busca determinar configuraciones de corte que maximicen el aprovechamiento de la madera respetando las restricciones geométricas, tecnológicas y comerciales del proceso (Hinostroza et al., 2013). La literatura presenta numerosos enfoques para resolver este problema, incluyendo programación matemática, heurísticas y metaheurísticas, los cuales difieren tanto en la representación geométrica de los patrones como en las estrategias de solución empleadas.

Una vez obtenidos los patrones de corte factibles, surge un segundo problema de decisión vinculado con la planificación de la producción. En esta etapa deben asignarse los patrones a los troncos disponibles, coordinando el procesamiento de la materia prima con la demanda de productos, las capacidades de producción y las políticas de inventario. Diversos autores han abordado esta problemática mediante modelos de programación lineal entera mixta (MILP), optimización robusta, programación estocástica y modelos integrados de planificación de la producción (Gaudreault et al., 2010; Maturana et al., 2010; Alvarez y Vera, 2014; Lobos y Vera, 2016).

Sin embargo, una característica común de gran parte de la literatura es la utilización de una única función objetivo durante el proceso de optimización. En la práctica, la gestión de un aserradero requiere evaluar simultáneamente indicadores económicos, productivos y de servicio, cuya importancia relativa depende del contexto operativo, de la disponibilidad de materia prima y de los compromisos comerciales. En consecuencia, un mismo plan de producción puede resultar adecuado bajo un determinado criterio y poco conveniente bajo otro.

En este trabajo se propone un sistema de soporte a las decisiones basado en un generador automático de patrones de corte y un modelo de programación lineal entera mixta para la planificación detallada de la producción diaria. El principal aporte consiste en evaluar el comportamiento del modelo bajo diferentes funciones objetivo representativas de distintos criterios de gestión, analizando el impacto que cada una de ellas tiene sobre el desempeño global del aserradero. De esta manera, se busca brindar una herramienta que permita asistir la selección de políticas de producción acordes con las prioridades operativas y estratégicas de cada empresa.

2. CASO DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA

El caso de estudio corresponde a un aserradero ubicado en el noreste argentino (NEA), cuya materia prima está constituida por troncos de pino taeda (*Pinus taeda*) provenientes de bosques implantados, clasificados según su diámetro en punta fina y longitud. El proceso productivo comprende operaciones de aserrado primario, secado y remanufactura, mediante las cuales los troncos son transformados en productos finales destinados a satisfacer la demanda. La transformación de la materia prima se realiza mediante patrones de corte (PC), distinguiéndose PC primarios, que generan productos intermedios a partir de los troncos, y PC secundarios, que transforman dichos productos intermedios en productos finales.

Con el propósito de asistir la planificación de la producción, se desarrolló un sistema de soporte a las decisiones (SSD) compuesto por un generador de patrones de corte y un modelo de programación lineal entera mixta (MILP). El generador determina todas las combinaciones factibles de productos para cada clase diamétrica de troncos, considerando las dimensiones de la materia prima y las restricciones tecnológicas del proceso. Posteriormente, el modelo MILP selecciona los patrones de corte y asigna la materia prima disponible con el objetivo de obtener un plan óptimo de producción que satisfaga la demanda respetando las capacidades operativas del aserradero.

La flexibilidad del modelo permite evaluar diferentes políticas de producción mediante la modificación de la función objetivo. En este trabajo se analizaron cuatro criterios de gestión: maximización del beneficio económico, minimización de las pérdidas de materia prima, maximización del volumen de



producción y minimización de la demanda insatisfecha. En todos los casos se persigue como condición básica la satisfacción de la demanda.

- 1- *Maximizar beneficio*: se calcula como la diferencia entre los ingresos por ventas de productos finales (I) y los costos. Dentro de estos se consideran: adquisición de materia prima (Cmp), procesamiento de aserrado (Ca) y remanufactura (Cr , cambio de PC primario (Cs), pérdida debido al mal estado de la materia prima (Cp), incumplimiento de demanda (Cd) y costos fijos (Cf).

$$\max FO1 = I - (Cmp + Ca + Cr + Cs + Cp + Cd + Cf) \quad (1)$$

- 2- *Minimizar pérdidas*: se busca minimizar las pérdidas de materia prima (P) generada por la utilización de los PC. Se obliga al modelo al cumplimiento de la demanda, incluyendo la insatisfacción de la demanda total volumétrica (IDv) multiplicada por un factor de peso f .

$$\min FO2 = P + f IDv \quad (2)$$

- 3- *Maximizar volumen de producción*: a diferencia de la FO 4, en este caso se busca aumentar el volumen producido de productos intermedios (Vf), y de esta forma aprovechar mejor el tronco.

$$\max FO3 = Vf - f IDv \quad (3)$$

- 4- *Minimizar demanda insatisfecha*.

$$\min FO4 = ID \quad (4)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para comparar las distintas FOs, se plantearon dos escenarios: uno con altas demandas de productos y otro con bajas demandas, considerando troncos de 5 clases diamétricas y 6 longitudes diferentes, 12 productos intermedios y 15 productos finales, y una jornada de 8 horas. A partir de estos productos, los PC fueron generados mediante un algoritmo, obteniéndose 1823 PC primarios y 361 PC secundarios. Los parámetros necesarios para el funcionamiento del modelo, como por ejemplo precios de venta, costos y tiempos de procesos fueron fijados acorde a un sistema real. Al igual que el total de las restricciones que rigen en el modelo, estos datos no se muestran por cuestiones de espacio, pero están disponibles para el lector interesado.

Los modelos fueron implementados y resueltos en GAMS utilizando el solver CPLEX en un Intel (R) Core (TM) i7-87000, 3,20 GHz. Cuenta con 38160 ecuaciones, 76163 variables continuas y 2880 variables binarias.

En el Cuadro 1 se presentan los resultados obtenidos al optimizar el modelo mediante las cuatro funciones objetivo consideradas, bajo escenarios de alta y baja demanda. Los valores resaltados corresponden a la solución óptima de la función objetivo. En ambos casos se observa que el comportamiento del modelo resulta consistente con el criterio optimizado, evidenciando los compromisos existentes entre rentabilidad, aprovechamiento de la materia prima, nivel de producción y servicio al cliente.

Cuadro 1. Resultados de las FO

	Escenario con Alta demanda				Escenario con baja demanda			
	FO1	FO2	FO3	FO4	FO1	FO2	FO3	FO4
Beneficio [10^5 \$]	31.57	29.09	27.14	29.24	16.91	10.49	7.23	12.74
Pérdidas [10^5 m ³]	82.49	76.69	80.07	104.50	41.94	35.65	47.99	124.48
Vol Prod [10^5 m ³]	221.87	257.81	296.49	269.98	117.47	226.17	336.65	220.56
Dem. Insatisfecha [U]	731.79	670.72	1067.64	670.72	0.00	0.00	0.00	0.00
Inventario [10^3 U]	0.67	36.29	53.15	16.49	0.22	87.88	144.33	24.05
Tiempo procesado [h]	8	8	8	8	3.30	2.59	8.00	4.84



En el escenario de alta demanda, el tiempo de procesamiento disponible constituye el principal factor limitante, por lo que ninguna política de producción logra satisfacer completamente los requerimientos. Debido a la penalización incorporada en las funciones objetivo, los niveles de demanda insatisfecha obtenidos con las FO 1 y FO 2 resultan similares a los alcanzados cuando dicho criterio se optimiza directamente (FO 4). Esto demuestra que el modelo prioriza el cumplimiento de la demanda aun cuando se persiguen otros objetivos.

Cuando el criterio consiste en maximizar el beneficio (FO 1), se obtiene el mayor resultado económico, aunque con un menor volumen de producción que el alcanzado por las restantes funciones objetivo. En cambio, minimizar las pérdidas de materia prima (FO 2) conduce a la selección de patrones de corte de mayor rendimiento, incrementando el volumen producido y reduciendo las pérdidas respecto de FO 1. Sin embargo, este mayor aprovechamiento implica producir artículos que no necesariamente responden a la estructura de la demanda, generando un incremento significativo del inventario.

La maximización del volumen de producción (FO 3) produce la mayor utilización de la capacidad instalada y el mayor volumen de productos obtenidos. No obstante, esta estrategia también genera el mayor nivel de inventario y el menor beneficio económico, además de registrar el peor desempeño en términos de demanda insatisfecha. Esto pone de manifiesto que incrementar la producción no implica necesariamente mejorar el nivel de servicio al cliente, ya que una parte importante de los productos obtenidos no coincide con los requerimientos del mercado.

En el escenario de baja demanda, todas las funciones objetivo logran satisfacer completamente la demanda. En consecuencia, las diferencias entre las soluciones se manifiestan principalmente en el tiempo de procesamiento, el inventario generado y el beneficio económico. La minimización de pérdidas (FO 2) requiere únicamente 2,6 horas de producción, aprovechando patrones de corte de mayor rendimiento y evitando procesar materia prima innecesaria. Por el contrario, la maximización del volumen de producción (FO 3) utiliza la totalidad de las ocho horas disponibles, incrementando el volumen producido en casi un 50 % respecto de FO 2. Sin embargo, ese incremento no aporta una mejora en el nivel de servicio —que ya es del 100 % en todas las funciones objetivo— sino que se traduce principalmente en un aumento del inventario final ($144,3 \times 10^3$ unidades frente a $87,9 \times 10^3$) y en un mayor consumo de materia prima, reflejado también en el incremento de las pérdidas de madera ($48,0 \times 10^5$ m³ frente a $35,7 \times 10^5$ m³). Este resultado evidencia que una política orientada exclusivamente a maximizar la producción puede inducir a fabricar productos sin demanda inmediata, incrementando simultáneamente los costos de almacenamiento y reduciendo la eficiencia global del proceso.

En conjunto, los resultados muestran que ninguna función objetivo domina simultáneamente al resto. Cada criterio mejora determinados indicadores en detrimento de otros, reflejando la naturaleza multicriterio del problema de planificación. En consecuencia, la selección de la función objetivo más adecuada depende de las prioridades operativas del aserradero y del contexto de demanda considerado.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un sistema de soporte a las decisiones para la planificación diaria de la producción en un aserradero, integrado por un generador automático de patrones de corte y un modelo de programación lineal entera mixta. El modelo fue evaluado mediante cuatro funciones objetivo representativas de distintos criterios de gestión, considerando escenarios de alta y baja demanda.

Los resultados evidenciaron que la función objetivo seleccionada influye significativamente sobre el plan de producción obtenido, generando diferencias en el desempeño económico, el aprovechamiento de la materia prima, el volumen producido, el nivel de inventario y el servicio al cliente. En consecuencia, la elección de la función objetivo constituye una decisión estratégica que debe responder a las prioridades operativas y comerciales de cada empresa.

En este contexto, el sistema de soporte a las decisiones desarrollado constituye una herramienta útil para analizar estos compromisos y seleccionar políticas de producción acordes con las prioridades estratégicas de cada aserradero.



5. LITERATURA CITADA

- ALVAREZ, P.P.; VERA, J.R. 2014. Application of robust optimization to the sawmill planning problem. *Annals of Operations Research* 219(1): 457-475.
- ANDERSON, D.R.; SWEENEY, D.J.; WILLIAMS, T.A.; CAMM, J.D.; COCHRAN, J.J. 2015. An introduction to management science: quantitative approaches to decision making. Cengage learning.
- BROZ, D.; ROSSIT, D.; ROSSIT, D.; CAVALLIN, A. 2016. Challenge in supply chains management in Argentina: the case of forestry-industrial sector. In *Proceedings of the The 8th International Conference on Production Research – Americas 2016*. Santiago de Chile, Chile.
- GAUDREAU, J.; FORGET, P.; FRAYRET, J.M.; ROUSSEAU, A.; LEMIEUX, S.; D'AMOURS, S. 2010. Distributed operations planning in the softwood lumber supply chain: models and coordination. *International Journal of Industrial Engineering: Theory Applications and Practice* 17(3): 168-189.
- HINOSTROZA, I.; PRADENAS, L.; PARADA, V. 2013. Board cutting from logs: Optimal and heuristic approaches for the problem of packing rectangles in a circle. *International Journal of Production Economics* 145(2): 541-546.
- LOBOS, A.; VERA, J.R. 2016. Intertemporal stochastic sawmill planning: Modeling and managerial insights. *Computers & Industrial Engineering* 95(1): 53-63.
- MATURANA, S.; PIZANI, E.; VERA, J. 2010. Scheduling production for a sawmill: A comparison of a mathematical model versus a heuristic. *Computers & Industrial Engineering* 59(4): 667-674.
- MENA-REYES, J.F.; VERGARA, F.; LINFATI, R.; ESCOBAR, J.W. 2024. Quantitative Techniques for Sustainable Decision Making in Forest-to-Lumber Supply Chain: A Systematic Review. *Forests* 15, 297.
- TRONCOSO, J.; D'AMOURS, S.; FLISBERG, P.; RÖNNQVIST, M.; WEINTRAUB, A. 2015. A mixed integer programming model to evaluate integrating strategies in the forest value chain—a case study in the Chilean forest industry. *Canadian Journal of Forest Research* 45(7): 937-949.



DESARROLLO DE UN MONITOR WEB DE PRECIOS FORESTALES DE LA PROVINCIA DE ENTRE RÍOS

Matías S. MARTINEZ¹, Ciro A. MASTRANDREA², Luis M. VERA²

RESUMEN

El sector foresto-industrial de la región mesopotámica es de mayor importancia a nivel país, en esta región se encuentra aproximadamente el 80 % de los bosques cultivados del país y la mayor cantidad de industrias de transformación primaria. La provincia de Entre Ríos es la tercera provincia en importancia, donde el cultivo de *Eucalyptus* que representa aproximadamente el 80% de la superficie forestada (Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial Nacional, 2025). La Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Concordia del INTA ha divulgado periódicamente desde el año 1983 información del mercado regional por medio de la planilla de precios Forestales. Estos son registros estáticos que limitan la capacidad de evaluar el impacto real de variables macroeconómicas complejas en el tiempo y en contextos inflacionarios. El objetivo de este trabajo es presentar el desarrollo de un Monitor Económico Forestal, que permite la visualización de datos de precios históricos, publicados en la planilla de precios forestales e indicadores históricos (Índice de Precios Internos al Por Mayor (IPIM), Índice de Precios al Consumidor (IPC) y tipos de cambio financieros). El monitor es una aplicación web de código abierto diseñada en el lenguaje R y el *framework Shiny*. Esta es una herramienta analítica funcional con acceso a la información económica forestal, que permite generar información técnica para la toma de decisiones estratégicas y fortalecer la capacidad de negociación de los productores regionales.

Palabras clave: *Eucalyptus*, Precio constante, aplicación web, variables macroeconómicas

1. INTRODUCCIÓN

El sector foresto-industrial contribuye al desarrollo económico de la provincia de Entre Ríos, Argentina. De acuerdo con datos del Portal de Parques Industriales de Entre Ríos (2026), esta actividad aporta el 3% del Producto Bruto Interno (PBI) primario y representa el 14% del PBI industrial de la provincia. A nivel nacional, Entre Ríos se posiciona como la tercera provincia con mayor superficie forestada, alcanzando las 147.210 hectáreas, donde el cultivo de *Eucalyptus grandis*, concentra aproximadamente el 80% del total implantado en la región (Subsecretaría de Desarrollo Foresto Industrial Nacional, 2025). La actividad Foresto industrial de Entre Ríos genera diversos productos que se comercializan en diferentes mercados y que modifican su valor comercial en el transcurso del tiempo, dependiendo del contexto del mercado, de la oferta y la demanda y otros factores

En este contexto, la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) INTA Concordia ha cumplido un rol de accesibilidad de información mediante la publicación periódica de su Planilla de Precios Forestales para el nordeste de Entre Ríos. Este instrumento releva de forma sistemática los valores de los productos más comercializados en el mercado local. A través de la planilla, se ha permitido a productores e industriales conocer los valores de referencia mínimos y máximos de distintos productos forestales, promoviendo procesos de negociación más equitativos y transparentes, al tiempo que funciona como un registro histórico esencial para el análisis de la evolución de precios en diferentes contextos macroeconómicos.

Sin embargo, la tradicional planilla del INTA Concordia presenta limitaciones por su naturaleza analógica y estática. Se presentan los valores nominales del mercado, pero carece de capacidades

¹ INTA, EEA Concordia, Entre Ríos, Argentina. *Contacto: martinez.matias@inta.gob.ar

² INTA, EEA Concordia, Entre Ríos, Argentina.



dinámicas para constatar los precios con variables macroeconómicas, como el Índice de Precios al Consumidor (IPC) o el Índice de Precios Internos al Por Mayor (IPIM). Ya que, en momentos de alta volatilidad económica, los precios nominales fijos no reflejan la ganancia o pérdida real del valor adquisitivo de los productos forestales.

Por ello, en el presente trabajo se realiza el desarrollo e implementación de una Aplicación Web de Monitoreo de Precios Forestales de Entre Ríos. Una plataforma digital que insume los datos relevados por el INTA Concordia, en un monitor interactivo y dinámico. Donde los usuarios pueden realizar análisis comparativos en tiempo real frente a los principales índices inflacionarios (IPC e IPIM), evaluar el comportamiento de los productos en moneda dura (dólar estadounidense), proyectar tendencias de precios futuros basados en las expectativas de mercado y analizar datos históricos de precios. De este modo, la herramienta de un simple registro histórico pasa a un sistema de soporte de observación de tendencia y evolución de los precios de determinados productos forestales para un periodo seleccionado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología se estructuró en tres etapas: (a) Relevamiento de base de datos (INTA Concordia), (b) Análisis de datos y desarrollo del *script* para la aplicación web y (c) Integración de Variables Macroeconómicas y cálculo de precios constantes y proyecciones.

a. Relevamiento de Datos Base (INTA Concordia)

La base de datos se obtiene de la Planilla de Precios Forestales diseñada por la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) INTA Concordia. Para el procesamiento de los datos se tomó como referencia el valor modal de los productos seleccionados, el cual representa el precio más frecuente en el mercado y actúa como el estimador central.

b. Análisis de datos y desarrollo del *scrip* para la aplicación web.

El monitor se desarrolló utilizando el lenguaje de programación R Core Team (2024), ejecutado mediante el entorno de desarrollo integrado *rstudioapi* (versión 0.18.0; Ushey et al., 2026), acoplado al *framework* de código abierto *Shiny* (1.13.0), Chang et al. (2026); para su funcionamiento en línea, el monitor web se desplegó en [shinyapps.io](http://intamadera.shinyapps.io/AppINTA_PrecioV/) (intamadera.shinyapps.io/AppINTA_PrecioV/).

c. Integración de Variables Macroeconómicas y cálculo de precios constantes

Se automatizó la captura de variables macroeconómicas en tiempo real mediante consultas HTTP (*http* y *jsonlite*) por medio de Interfaces de Programación de Aplicaciones (APIs) financieras de acceso público, obtenidas de la base de datos del INDEC. A su vez también, la plataforma utiliza el tipo de cambio diario (MEP) de APIs de referencia local, obtenido de la página web oficial de BCRA.

Para el análisis del valor real (precio constante), se adopta el Índice de Precios Internos al Por Mayor (IPIM), provisto por la API de Datos Abiertos del Ministerio de Economía de la Nación (series del INDEC). El IPIM refleja las fluctuaciones de los costos industriales, maquinaria, combustibles y energía que impactan en la cadena foresto-industrial. El valor base=100 utilizado para el cálculo de precio constante corresponde al último registro disponible del mes corriente, actuando como el valor de base para homogeneizar el poder de compra histórico.

Para las proyecciones (horizonte de hasta 12 meses) se integra de forma predictiva las tasas de inflación y expectativas macroeconómicas publicadas por el Relevamiento de Expectativas de Mercado (REM) del Banco Central de la República Argentina (BCRA), aplicando de forma iterativa dichos factores de corrección sobre el último precio base registrado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desarrollo del Monitor Económico Forestal - INTA Concordia resultó en una plataforma web que transforma los datos estáticos en un mando integral para la observación histórica y proyecciones esperadas en base al REM. En la Figura 1, se observa la interfaz, donde se estructura mediante un panel lateral de control de parámetros y un cuerpo principal de visualización analítica de datos.

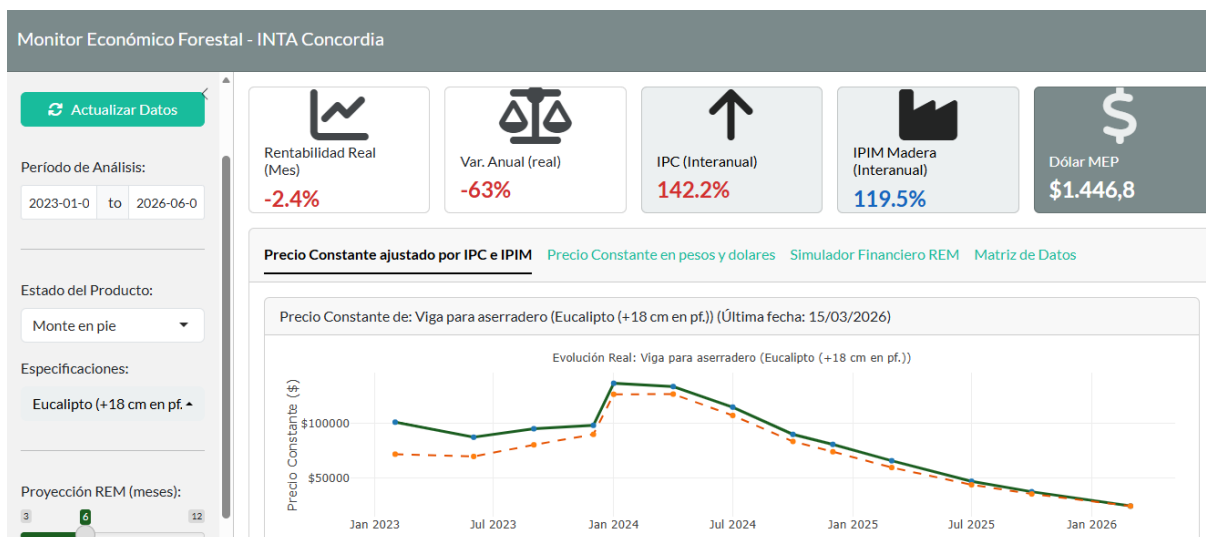


Figura 1. Interfaz del Monitor Económico Forestal – INTA Concordia.

La presentación de un panel de control en el margen izquierdo permite al usuario mediante cuatro filtros principales la selección del período de análisis, estado del producto, especificaciones técnicas y proyección REM. En la parte superior se encuentran indicadores de actualización automatizada que sintetizan el escenario macroeconómico sectorial de rentabilidad real mensual, variación interanual real, IPC Interanual, IPIM interanual específico para el bloque de madera y dólar MEP.

Se poseen estructura de 4 pestañas, de los cuales 3 son gráficas y la última (Matriz de datos) es una planilla de datos. Los gráficos corresponden a precios constantes, valoración del producto forestal en dólares y en pesos en diferentes momentos de registro y por último el gráfico de proyección de precio según el REM.

A través de estos indicadores, gráficos y proyecciones, el Monitor de Precios Forestales, permite visualizar un análisis crítico de la evolución de los precios y utilizarlo como una herramienta adicional en la toma de decisiones estrategias para negociaciones de los productos o para entender el contexto del mercado en determinados periodos.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo del Monitor Económico Forestal - INTA Concordia, permitió utilizar la planilla de precios forestales tradicional en un entorno digital dinámico, donde a través de programación se puede transferir conocimientos y generar comparativas de precios de productos forestales en diferentes periodos de tiempos, en diferente tipo de moneda y analizar su respectiva proyección de valor.

Para el sector forestal, se pone a disposición de una nueva herramienta adicional para efectuar análisis económicos, por medios de utilización dinámica de valores macroeconómicos y datos de determinados periodos de la planilla de precio forestal como insumo de toma de decisión en el mercado actual.

Desde el punto de vista institucional, el INTA Concordia contribuye a una solución tecnológica de fácil accesibilidad para el sector, promueve la transparencia comercial, y contribuye con sistemas de soporte para la toma de decisiones en el sector.

5. LITERATURA CITADA

- POSIT TEAM. 2024. RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA. <http://www.posit.co/>
- CHANG, W., CHENG, J., ALLAIRE, J., SIEVERT, C., SCHLOERKE, B., XIE, Y., ALLEN, J., MCPHERSON, J., DIPERT, A., & BORGES, B. 2024. *Shiny: Web Application Framework for R*. R package version 1.8.1. <https://CRAN.R-project.org/package=shiny>
- CHANG, W., CHENG, J., ALLAIRE, J., SIEVERT, C., SCHLOERKE, B., ADEN-BUIE, G., XIE, Y., ALLEN, J., MCPHERSON, J., DIPERT, A. Y BORGES, B. 2026. *shiny: Web Application Framework for R (Versión 1.13.0)*



- [Paquete de R]. Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.shiny>
- DIRECCIÓN DE INDUSTRIA Y PARQUES INDUSTRIALES. (s.f.). Industrias. Gobierno de Entre Ríos. Recuperado el 3 de junio de 2026, de <https://parquesindustriales.entrerios.gov.ar/industria>
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y CENSOS. 2026. Índice de Precios Internos al Por Mayor (IPIM). Series históricas. Recuperado el 3 de junio de 2026, de <https://www.indec.gob.ar/>
- R CORE TEAM. 2026. *R: A language and environment for statistical computing* (Versión 4.5.0) [Software de computación]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- SUBSECRETARÍA DE DESARROLLO FORESTO INDUSTRIAL. 2025. *Tablero de Plantaciones Forestales*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Ministerio de Economía de la Nación. <https://www.magyp.gob.ar/desarrollo-foresto-industrial/tablero-plantaciones-forestales.php>
- USHEY, K., ALLAIRE, J., WICKHAM, H. Y RITCHIE, G. 2026. rstudioapi: Safely Access the RStudio API (Versión 0.18.0) [Paquete de R]. Comprehensive R Archive Network (CRAN). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.rstudioapi>



CAPITAL FORESTAL Y CONTINUIDAD DE DOSEL COMO CRITERIOS PARA EL DISEÑO SILVOPASTORIL: ESTUDIO DE CASO EN UN BOSQUE NATIVO DE SANTIAGO DEL ESTERO, ARGENTINA

Julio MICHELA¹, Sebastián KEES², Guillermo MERLETTI¹, Fabian REUTER³

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue desarrollar una metodología de delimitación espacial basada en la continuidad del dosel y la concentración del capital forestal para el diseño de sistemas silvopastoriles en Santiago del Estero, Argentina. En un ensayo de 29,9 ha (INTA), se censaron los individuos leñosos y se analizaron los árboles del estrato superior ($DAP \geq 15$ cm) mediante QGIS 3.34. A partir de un radio inicial de 6,1 m, se determinó un diámetro estructural equivalente de 10,7 m para integrar las proyecciones horizontales superpuestas y delimitar las áreas con continuidad estructural. Las áreas con continuidad de dosel ocuparon el 73,7 % de la superficie (22,03 ha) y concentraron el 100 % de los ejemplares del estrato superior, absorbiendo la totalidad del área basal, el volumen comercial y el valor económico de la masa arbórea, sin registrarse aportes en el área remanente. Se evidenció una estrecha asociación espacial entre la estructura del bosque y su valor económico. La metodología propuesta constituye una herramienta objetiva y eficaz para identificar sectores prioritarios en el diseño silvopastoril, permitiendo planificar la actividad ganadera sin comprometer la permanencia ni los atributos esenciales del ecosistema forestal.

Palabras clave: sistemas silvopastoriles – análisis espacial – capital forestal – Santiago del Estero

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, los sistemas silvopastoriles (SSP) se han propuesto como alternativa para compatibilizar la producción ganadera con la conservación de los bosques nativos (Laclau, 2013). El interés por comprender su funcionamiento en regiones áridas y semiáridas ha crecido debido a la fragilidad de los ambientes, los múltiples beneficios que ofrecen y la importancia de conservar especies y valores bioculturales (Roger, 2022). Sin embargo, su implementación sigue generando más incertidumbres que consensos técnicos sobre qué elementos del bosque deben preservarse para asegurar su funcionalidad y permanencia.

En Argentina, la sanción la Ley Nacional N° 26.331 constituyó un punto de inflexión al establecer límites a la habilitación de tierras forestales y reconocer la necesidad de conservar ecosistemas cuya estabilidad ecológica depende de la permanencia de la cobertura boscosa. Este marco normativo impulsó la búsqueda de alternativas productivas que permitieran compatibilizar el aprovechamiento ganadero con la conservación de los atributos esenciales del bosque.

Específicamente, en Santiago del Estero, Coronel de Renolfi y Brassiolo (2008) identificaron prácticas de producción de tipo extractivas y desordenadas en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Copo, señalando que estas no son compatibles con el fin que debe cumplir dicha área, siendo necesario generar un plan de recomposición de la zona y reordenar los sistemas productivos mediante planes de producción que conduzcan a un equilibrio óptimo desde la óptica social, ecológica y económica.

En este contexto, la identificación objetiva de los componentes arbóreos que sostienen

¹ INTA-EEA Santiago del Estero. Jujuy 850 (4200). Santiago del Estero, Argentina.

² Campo Anexo Estación Forestal Plaza – INTA EEA Sáenz Peña – Lote IV- Colonia Santa Elena (3536) – Presidencia de la Plaza. Chaco. Argentina – Consejo Profesional de Ciencias Forestales del Chaco

³ Universidad Nacional de Santiago del Estero – Facultad de Ciencias Forestales - Av. Belgrano (s) 1912, (4200) Santiago del Estero, Argentina.



simultáneamente la estructura y el capital forestal adquiere particular relevancia para el diseño de sistemas silvopastoriles. Ospino et al. (2022) señalan que los SSP representan una asociación entre producción ganadera y forestal, "y no simplemente fincas ganaderas arboladas, donde los árboles prácticamente no contribuyen a la economía de la finca". Bajo esta perspectiva, la incorporación de criterios que permitan identificar y conservar los componentes arbóreos que sostienen simultáneamente la estructura y el capital forestal del bosque resulta fundamental para el diseño de sistemas silvopastoriles sostenibles. El capital forestal se refiere al conjunto de árboles que sostienen simultáneamente la estructura y el principal valor productivo del bosque. Su mantenimiento y capitalización en el tiempo dependen de la conservación de los procesos de regeneración y del desarrollo de las clases diamétricas menores e intermedias que aseguran la renovación del estrato arbóreo superior.

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para la delimitación de áreas de estructura forestal con base en la continuidad del dosel y la concentración espacial del capital forestal, destinada al diseño silvopastoril en un bosque nativo de Santiago del Estero, Argentina. El planteo propuesto consiste en que la continuidad del dosel permite identificar áreas que concentran el capital forestal y constituyen sectores prioritarios para el diseño silvopastoril.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realiza en una superficie de 29,9 ha en el Lote 19 del Campo Experimental Francisco Cantos, dependiente de la Estación Experimental Agropecuaria INTA Santiago del Estero, localizado sobre la Ruta Nacional N° 9 a 27 km al sur de la ciudad de Santiago del Estero, a 28°05' S y 64°15' W (Gráfico1).

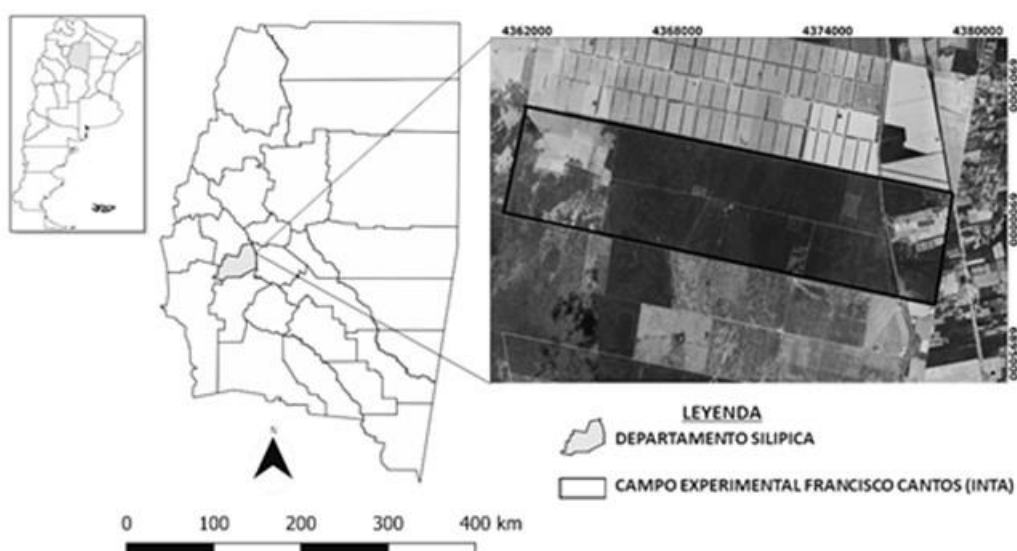


Gráfico 1. Ubicación relativa del área de estudio.

El tipo de bosque corresponde al Parque Chaqueño Occidental. Araujo et al. (2008) describen un estrato arbóreo integrado principalmente por quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis lorentzii* Griseb. Engl.) y quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco* Schltdl.). En el estrato intermedio se destacan algarrobo negro (*Neltuma nigra* Griseb. C. E. Hughes & G. P. Lewis), mistol (*Ziziphus mistol* Griseb.) y brea (*Cercidium australe* Jhonst.). El estrato arbustivo está compuesto por diversas especies de garabatos (*Acacia* sp.), tala (*Celtis pallida* Torr.), atamisqui (*Atamisquea emarginata* Miers ex Hook. & Arn.), castela (*Castela coccinea* Griseb.), piquillín (*Condalia microphylla* Cav.) y molles (*Schinus* sp.). Brassiolo et al. (1993) describen un estrato herbáceo integrado por gramíneas y latifoliadas. Concluye Araujo et al. (2008) afirmando que se trata de un bosque en recuperación luego de una explotación forestal.

Se censaron todos los individuos leñosos con diámetro a la altura del pecho (DAP) igual o superior a 5 cm. Para cada ejemplar se registraron la especie, el DAP y su ubicación geográfica. Para el análisis

espacial se seleccionaron los individuos de quebracho colorado santiagueño y quebracho blanco con DAP igual o superior a 15 cm, considerados en este estudio integrantes del estrato arbóreo superior. A partir de la distribución espacial de estos individuos se generaron áreas de influencia (buffer) mediante el software QGIS 3.34 (QGIS.org, 2024). El radio inicial utilizado fue de 6,1 m, correspondiente al percentil 95 de las distancias registradas entre árboles estructurales y regeneración consolidada de quebracho colorado santiagueño y quebracho blanco (Michela et al., 2026). Este radio se utilizó para generar una superficie estructural de referencia mediante la integración de las áreas de influencia individuales. Relacionando dicha superficie con el número total de árboles estructurales censados, se estimó una superficie promedio por individuo que, asumiendo una proyección horizontal circular, se transformó en un diámetro estructural equivalente, definido como el diámetro del círculo cuya superficie representa la ocupación espacial promedio por individuo. La utilización de una proyección horizontal circular constituyó una simplificación geométrica destinada a representar la ocupación espacial promedio de los individuos y facilitar la delimitación operativa de áreas con continuidad estructural. El diámetro estructural equivalente se utilizó para delimitar las áreas con continuidad de dosel mediante la integración de áreas de influencia superpuestas, considerando que la superposición de dichas áreas constituye un indicador de continuidad espacial del estrato arbóreo superior. Las superficies resultantes fueron consideradas en este trabajo como áreas de estructura forestal. Sobre las áreas delimitadas se calculó la superficie ocupada y se identificaron los individuos contenidos en cada sector. Finalmente, se determinó la concentración espacial del capital forestal mediante variables previamente estimadas para el rodal, incluyendo área basal, volumen comercial y valor económico de la masa arbórea. La proporción de superficie y de capital forestal contenida dentro de las áreas con continuidad de dosel fue utilizada como criterio para evaluar su potencial aplicación al diseño de sistemas silvopastoriles.

3. RESULTADOS

3.1. Delimitación de áreas con continuidad de dosel

Se identificaron 1206 ejemplares de quebracho colorado santiagueño y quebracho blanco con DAP igual o superior a 15 cm, considerados elementos estructurales del estrato arbóreo superior. A partir de la integración espacial inicial de estos individuos se obtuvo una superficie estructural de referencia de 10,83 ha. Relacionando dicha superficie con el número de árboles estructurales censados, se estimó una ocupación promedio de 89,8 m² por individuo. Asumiendo una proyección horizontal circular, esta superficie equivale a un diámetro estructural equivalente de 10,7 m. El Gráfico 2 presenta, de izquierda a derecha, la distribución espacial de los árboles estructurales, las áreas de influencia generadas mediante un radio de 8,6 m y las áreas de influencia obtenidas con el diámetro estructural equivalente de 10,7 m. El radio de 8,6 m se incorpora únicamente con fines comparativos, ya que representa un valor suficiente para mantener la continuidad espacial del capital forestal, mientras que el diámetro estructural equivalente de 10,7 m constituye el umbral máximo teórico adoptado como criterio metodológico para la delimitación de las áreas con continuidad de dosel.

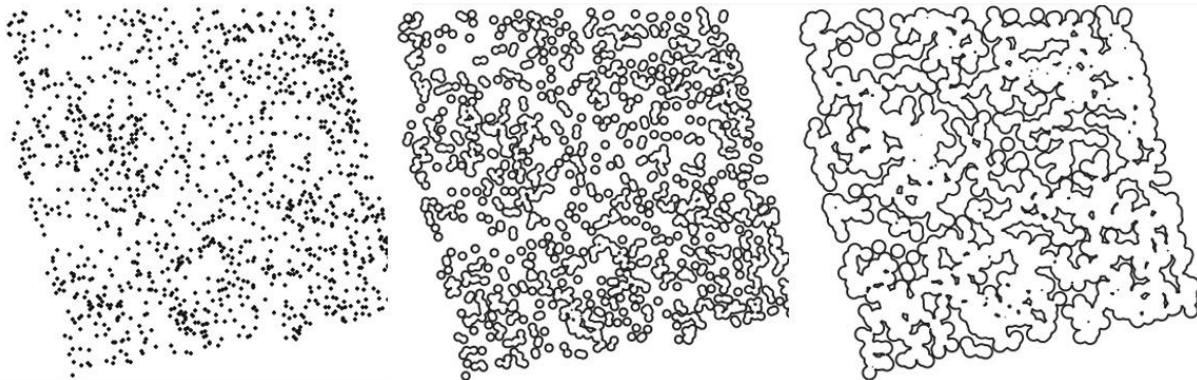


Gráfico 2. Ubicación de quebrachos con DAP > 15 cm (izquierda) y su área de influencia con radios de 8,6 m (centro) y 10,7 m (derecha).

La aplicación de este valor como parámetro de análisis espacial permitió delimitar áreas con continuidad de dosel mediante la integración de las áreas de influencia superpuestas. La superficie total ocupada



por estas áreas alcanzó las 22,02 ha, equivalentes al 73,7 % de la superficie total del ensayo, mientras que la superficie remanente fue de 7,88 ha (26,3 %). El análisis espacial mostró que la totalidad de los ejemplares de quebracho colorado santiagueño y quebracho blanco con DAP igual o superior a 15 cm quedó contenida dentro de las áreas con continuidad de dosel. Por el contrario, la superficie remanente no registró individuos pertenecientes a esta categoría diamétrica. Estos resultados indican que las áreas delimitadas mediante la metodología propuesta concentran la totalidad de los árboles estructurales del bosque, diferenciándolas de sectores donde no se verificó la presencia de individuos pertenecientes al estrato arbóreo superior.

3.2. Concentración espacial del capital forestal

El 100 % del área basal, del volumen comercial y del valor económico asociado a los árboles estructurales se concentró dentro de las áreas con continuidad de dosel, equivalentes al 73,7 % de la superficie total del ensayo. Por el contrario, la superficie remanente (26,3 %) no aportó área basal, volumen ni valor económico asociado a los individuos considerados en el estudio.

Estos resultados evidencian una elevada concentración espacial del capital forestal en las áreas con continuidad de dosel, respaldando su utilización como criterio para la delimitación de sectores prioritarios destinados al diseño silvopastoril. La distribución de superficies obtenida mediante la metodología propuesta se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Distribución de áreas en el ensayo según continuidad del dosel

Categoría	Superficie en has	Participación %
Área estructural con continuidad de dosel	22,02	73,7
Área no estructural	7,88	26,3
Total del ensayo (estudio de caso)	29,9	100

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La estructura del bosque y el capital forestal presentan una estrecha asociación espacial. La continuidad del dosel permitió identificar áreas que concentran los árboles estructurales responsables de sostener el estrato arbóreo superior y, simultáneamente, el capital forestal asociado. Estos resultados coinciden con lo señalado por Ospino et al. (2022), quienes sostienen que los SSP constituyen una asociación entre producción ganadera y forestal, "y no simplemente fincas ganaderas arboladas, donde los árboles prácticamente no contribuyen a la economía de la finca". En este sentido, la metodología propuesta aporta un criterio objetivo para el diseño silvopastoril en bosques nativos. La utilización de un umbral de 15 cm de DAP para la identificación de los individuos estructurales respondió a dos criterios complementarios. Por una parte, los ejemplares de menor diámetro presentan una aptitud limitada para la obtención de productos forestales de valor comercial. Por otra, las clases diamétricas iguales o superiores a dicho umbral se corresponden con estados de desarrollo más avanzados dentro de la dinámica del bosque y reúnen las características necesarias para contribuir al sostenimiento de la estructura del estrato arbóreo superior (Donoso et al., 2018).

Laclau (2013) sostiene que los sistemas silvopastoriles pueden contribuir a la conservación de los ecosistemas naturales cuando se implementan con objetivos de mantenimiento de la estructura forestal a largo plazo. Asimismo, Wenzel y Hampel (1998) destacan la importancia de evitar intervenciones que impliquen una apertura excesiva del estrato superior del bosque. En este contexto, la metodología propuesta constituye una herramienta para delimitar áreas prioritarias destinadas al diseño silvopastoril orientado al mantenimiento de la estructura forestal.

La delimitación de áreas con continuidad de dosel no solo permite identificar sectores prioritarios para la conservación de la estructura forestal, sino que también aporta un criterio espacial para el diseño de sistemas silvopastoriles. Al integrar la continuidad del dosel con la concentración del capital forestal, la metodología propuesta constituye una herramienta objetiva para apoyar la planificación espacial del bosque. En este sentido, la concentración del capital forestal en el 73,7 % de la superficie indica que



es posible identificar espacialmente los sectores que sostienen la estructura del bosque. Asimismo, el mantenimiento de la continuidad del dosel favorece la conectividad estructural del estrato arbóreo superior, aspecto de interés para la conservación del bosque nativo. La delimitación de estas áreas no constituye por sí misma una propuesta de manejo, sino un criterio espacial para identificar sectores donde la conservación de la estructura forestal debe ser considerada en el diseño de sistemas silvopastoriles. La definición de las intervenciones de manejo correspondientes excede el alcance del presente estudio y dependerá de los objetivos y condiciones particulares de cada predio.

Finalmente, la conservación de la estructura del bosque implica simultáneamente la conservación de su capital forestal. La relevancia económica de la madera en pie de quebracho colorado santiagueño señalada por Michela y Kees (2025) refuerza que los árboles que conforman el estrato superior del bosque constituyen, al mismo tiempo, componentes estructurales esenciales y portadores de una proporción significativa de su capital forestal. La metodología propuesta aporta una base objetiva para incorporar la conservación de la estructura del bosque y de su capital forestal en el diseño silvopastoril de bosques nativos. Los resultados corresponden a un estudio de caso desarrollado en un bosque del Chaco Occidental, por lo que la extrapolación a otras condiciones ambientales o estructurales requiere validaciones adicionales.

5. LITERATURA CITADA

- ARAUJO, P.; ITURRE, M.C.; ACOSTA, V.H.; RENOLFI, R.F. 2008. Estructura del bosque de la María EEA INTA Santiago del Estero. *Quebracho* 16(1): 5-19.
- BRASSIOLO, M.M.; RENOLFI, R.F.; GRAFE, W.H. 1993. Manejo silvopastoril en el Chaco Semiárido. *Quebracho* 1: 15-28.
- CORONEL DE RENOLFI, M.; BRASSIOLO, M. 2008. Uso de sistemas silvopastoriles en la zona de amortiguamiento del Parque Nacional Copo, Santiago del Estero. Un análisis económico. *Quebracho* 16: 69-83.
- DONOSO, H.; PROMIS BAEZA, Á.; SOTO, D.P. 2018. *Silvicultura en bosques nativos. Experiencias en silvicultura y restauración en Chile, Argentina y el oeste de Estados Unidos*. La Iniciativa Chile, Facultad de Silvicultura de OSU. 310 pp
- LACLAU, P. 2012. Consideraciones económicas y ambientales para la toma de decisiones en sistemas silvopastoriles. In *Proceedings of the 2nd National Congress of Silvopastoral Systems, INTA Editions, Santiago del Estero* (pp. 359-370).
- LEY 26.331: Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental de los Bosques Nativos. (28 de noviembre de 2007). Boletín Oficial de la República Argentina, Buenos Aires, 28 de diciembre de 2007.
- MICHELA, J.F.; REUTER, F.A.; MERLETTI, G.J.; KEES, S. 2026. En revisión. *Propuesta de manejo estructural y espacial del bosque nativo para sistemas silvopastoriles en Santiago del Estero, Argentina* [Manuscrito presentado para publicación].
- MICHELA, J.F.; KEES, S.M. 2025. Análisis económico de valor en pie de *Schinopsis lorentzii* (Griseb.) Engl. en la región del Chaco, República Argentina, durante el período 2003-2021. *Agrotecnia*, (36). <https://revistas.unne.edu.ar/index.php/agr/article/view/9013>.
- OSPINO, M.; MURILLO, O.; ALFARO, M. 2022. Análisis financiero y de escenarios de financiamiento del componente forestal en sistemas silvopastoriles. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 19(45): 26-37.
- QGIS.org. 2024. QGIS 3.34 [Software informático]. QGIS.org. <https://qgis.org>.
- ROGER, E. 2022. Las plantas útiles en los sistemas silvopastoriles tradicionales del noreste de Santiago del Estero, Argentina. *Etnobiología*, 20(2): 252-269.
- WENZEL, M.; HAMPEL, H. 1998. Regeneración de las principales especies arbóreas del Chaco húmedo argentino. *Quebracho* 6: 5-18.



CLASIFICACIÓN PRODUCTIVA DE SISTEMAS SILVOPASTORILES SEGÚN EL ÁREA BASAL (AB) PARA GÉNERO *Eucalyptus* Y PINO HÍBRIDO (PEExPCH) PARA MISIONES Y NORTE DE CORRIENTES, ARGENTINA

Luis COLCOMBET¹, Mauro LOTO¹, Adrián MOLLER¹, Carlos Emilio MAIDANA², Paola SANZ³,
Paola GONZALEZ¹, Eliseo CORNELIUS³, Karina WDOWIAK⁴

RESUMEN

El propósito de los sistemas silvopastoriles (SSP) es optimizar los ingresos netos, aprovechando las sinergias de las interacciones productivas, ecológicas, sociales y económicas entre los componentes forestal, forrajero, ganadero, suelo y humano. El objetivo de este trabajo fue proponer una clasificación conceptual de SSP's para *Eucalyptus* y pino híbrido (PEExPCH), basada en la radiación fotosintéticamente activa (RFA) que alcanza el estrato forrajero. Como indicador de RFA, por su grado de ajuste razonable, se recurre al Área Basal (AB). La metodología consistió en clasificar los SSP mediante el AB en función de la productividad forestal y ganadera. Se describen 4 grados SPP, desde el grado I, que prioriza la producción ganadera (igual a la productividad a cielo abierto) hasta el grado IV, que en el fondo solo permite el forrajeo del sotobosque por el ganado para disminuir la peligrosidad de incendios forestales. Despejando N (densidad, stand de árboles. ha⁻¹) en la fórmula de AB, se presentan las densidades límites conceptuales de manejo de las 4 categorías presentadas. A través de ello, se puede modelar la producción y seleccionar el manejo silvopastoril que mejor se ajusta a los objetivos productivos del predio SSP, en relación a los mercados forestales y ganaderos de su entorno.

Palabras clave: *grado ssp, sombreado, producción forestal, diámetro medio objetivo.*

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) consisten en una variante de la agroforestería en la cual se combina la producción forestal con la ganadera. Los SSP están diseñados para capturar los beneficios resultantes de las interacciones ecológicas y económicas entre ambos componentes (Gómez, 2019), a las que se agregan las humanas (los administradores de los sistemas). A escala mundial existen cerca de mil millones de ha agroforestales, de las cuales una parte importante son SSP's (Kumar et al., 2014). La superficie forestada con especies de los géneros *Pinus* y *Eucalyptus* en la región Mesopotámica Argentina (Misiones, Corrientes y Entre Ríos) es de 918 000 ha (MAGYP, 2025). De esa superficie de plantaciones forestales, los productores que administran alrededor de 80 000 ha adoptaron manejos SSP's (Peri et al., 2018), esperando que esa intensificación del sistema productivo rinda mayores beneficios que los sistemas forestales o ganaderos puros (Colcombet et al., 2015; Murgueitio et al., 2015; Pantiu et al., 2015; Peri et al., 2016) y al mismo tiempo, conservar ciertos servicios ecosistémicos (e.g. regulación de la calidad del aire, captura de carbono (C), provisión de productos no maderables, mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Chará et al., 2015; Montagnini et al., 2015; Abbas et al., 2017; Kay et al., 2019). En los SSP's, la producción forrajera (kg. ha⁻¹) no es un predictor suficiente para modelar producción de carne. En efecto, debe complementarse con la mayor concentración proteica del forraje y la menor exposición a estrés térmico que generan estos sistemas, lo que habilita mejores índices de conversión pasto – carne o leche (Pachas et al., 2012; Zimerman et al., 2025). Al mismo tiempo, promueven el desarrollo de árboles de aptitud industrial para usos superiores (González et al., 2012; Colcombet et al., 2012). A diferencia de los

¹ INTA-EEA Montecarlo, Misiones, Argentina.

² INTA-EEA Cerro Azul, Misiones, Argentina.

³ INTA-AER Santa Rita, Misiones, Argentina.

⁴ INTA-AER Apóstoles, Misiones, Argentina



sistemas forestales tradicionales, orientados a maximizar el volumen por unidad de superficie, los SSP implementan pautas de manejo enfocadas en la obtención de rollizos de mayor diámetro y mayor proporción de madera *clear* en menor lapso de tiempo, que puede otorgar un valor comercial incremental al producto final (Luccerini et al., 2014).

Entre las herramientas más utilizadas para comprender el impacto de los árboles en los sistemas, están las variables de fuste y de copa, las cuales permiten evaluar el crecimiento, la estructura y la productividad forestal, así como su interacción con los demás componentes, según su densidad y espaciamiento (Imaña-Encinas, 2011). El diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total de los árboles (At), el área basal (AB), diámetro y longitud de copa viva (LCV), entre otras, son indicadores clave para determinar el estado del componente arbóreo, su influencia en el sotobosque (sombreamiento) y la producción forrajera (Russo, 2015). El estudio de estas variables facilita la toma de decisiones sobre el manejo del sistema, además de aportar información crítica para mejorar la eficiencia y sostenibilidad de los SSP (Mujica, et al., 2023, en Sanchis Cooper, 2025). En consecuencia, la evaluación de estas variables permite caracterizar la estructura del componente arbóreo y analizar su relación con el desempeño de los sistemas silvopastoriles bajo diferentes condiciones de manejo.

La experiencia acumulada indica que, dentro de cierto rango, es viable adaptar los SSP's a los objetivos productivos deseados. Podemos identificar cuatro perfiles de manejo: "Categoría I", manejos silvícolas que privilegian el desarrollo del componente ganadero, alcanzando niveles de productividad animal comparables o superiores a los obtenidos en sistemas ganaderos a cielo abierto, al que se adiciona el 30% del volumen potencial forestal puro con mayores diámetros individuales. Un segundo grupo, "categoría II", de estos sistemas que enfatiza un compromiso ganadero – forestal "50-70%" del potencial puro. Una tercera, "Categoría III", que prioriza el desarrollo forestal (70% del potencial volumétrico con mayores diámetros) en el cuál un error del manejo forrajero-ganadero puede comprometer seriamente el desarrollo pastoril. Finalmente, sistemas cuyo objetivo principal está basado en mejorar la seguridad ante la amenaza de los incendios forestales, introduciendo animales para disminuir el volumen del sotobosque "Categoría IV". De estas observaciones, se presenta un primer avance conceptual que integra los principales indicadores productivos de los componentes forestal y ganadero en una tabla síntesis, estructurada en función del área basal (AB), variable que mostró una correlación consistente con la disponibilidad de radiación fotosintéticamente activa (RFA) en el estrato forrajero. Para construirla, se han calculado promedios de situaciones reales de campo en plantaciones comerciales y ensayos SSP bajo plantaciones de PEEXPCH y *Eucalyptus*. El objetivo de este trabajo es aportar una herramienta técnico-conceptual que facilite la planificación y el manejo de sistemas silvopastoriles del Nordeste Argentino, contribuyendo a la toma de decisiones mediante la integración de variables forestales y ganaderas que condicionan el desempeño productivo de estos sistemas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

A partir del 2021, desde el proyecto i 015 "Sistemas silvopastoriles hacia su uso sustentable", se impulsa el desarrollo de una ficha de evaluación rápida silvopastoril que, entre otros indicadores, releva la importancia de la relación entre producción forrajera y ganadera en concordancia con la disponibilidad de RFA (Colcombet et al., 2023). Un primer avance se construye en "reuniones de expertos" extensionistas, investigadores y practicantes SSP, llevados a cabo en las EEA "Cerro Azul" y "El Sombrerito", en 2022. Las variables más prácticas relevadas en esas reuniones fueron AB y "cobertura de copa". Este último, actualmente resulta de más fácil relevamiento mediante el uso de drones en combinación con algoritmos. La relación entre AB y RFA es negativa, a mayor AB, menor RFA y consecuentemente menor producción forrajera y ganadera. Una primera aproximación multi-especie para *Pinus elliottii*, Pino híbrido PEEXPCH (*Pinus elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis*), clones de *Eucalyptus*, para los ambientes Chaqueño y Correntino-Misionero, arroja una correlación baja. Influyen en este resultado, además de la cobertura de copas, la distribución (macizos abiertos y líneas apareadas) de los árboles en el sistema, la forma de las copas, desde globosas (copas anchas de especies colonizadoras como el *Pinus taeda*, *P. elliottii* y el *Neltuma alba*) a "estrictas" (copas estrechas de desarrollo vertical como PEEXPCH y clones de *Eucalyptus*. Manuel Radke (2023), en su tesis hecha en base a SSP con Pino híbrido, distribuidos en líneas apareados con callejones de entre 10 y 20 m, calculó una correlación negativa de -0,9 entre AB y RFA. Al



momento, dada la diversidad de formas de copas de los *Eucalyptus*, la correlación es menor al del PEEpCH. Influyen en esa dispersión tanto los parámetros antes citados como el pastoreo realizado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A modo ilustrativo, en base a la clasificación descripta en la introducción, el **Cuadro 1**, especifica los rangos de RFA y los resultados ganaderos y forestales esperables de los cuatro grados mencionados en función de las variables AB y LCV, aplicables para pino híbrido PEEpCH (*Pinus elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis*) y *Eucalyptus* sp. en el entorno de Misiones y el norte de Corrientes, Argentina. Se menciona también, a modo de ejemplo, un modo de estimar la densidad adecuada de árboles a lograr para comercializar rollizos de los diámetros más aceptados en el mercado. La Densidad Orientativa Máxima Objetivo (**DOMO**) para Diámetros Altura de Pecho Medio Objetivos (DAPMO), se calcula despejando el N (número de árboles. ha⁻¹) de la fórmula de cálculo del AB, siendo ella:

$$\text{DOMO (árb. ha}^{-1}\text{)} = (\text{AB (m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}\text{)} * 1,27324) / (\text{DAPMO (m)})^2$$

Cuadro 1. Grados SSP asociados a usos, RFA %, AB, LCV, producciones ganaderas expresadas como proporción (%) del que se obtuviera en su manejo convencional “puro”.

Grado SSP	IV	III	II	I	0
Tipo de manejo	Manejo forestal puro	¡ATENCIÓN! Error de manejo puede perder estrato forrajero	Privilegia el componente forestal	Privilegia el componente ganadero	Manejo ganadero a “cielo abierto”
USO y valor	Forrajeo material combustible	Forrajeo ocasional estratégico	Uso a lo largo de todo el año		
Grado de sombreadamiento (S) - (%/CA)	S > 60%	60% > S > 45%	45% > S > 30%	S < 30%	0%
Área Basal (AB) (m² ha⁻¹)	AB > 20-22	20-22 > AB > 15-17	15-17 > AB > 10-12	AB < 10-12	0
Longitud de copa viva (LCV) (km. ha⁻¹)	LCV > 2,5	2,5 > LCV > 2,1	2,1 > LCV > 1,6	LCV < 1,6	0
Producción de carne (%/CA)	<< 40% del cielo abierto	+/- 50% del cielo abierto	+/- 75% del cielo abierto	+/- 100% cielo abierto	100%
Producción de madera (%/ftal. puro)	100%	+/- 90% del forestal puro	+/- 65% del forestal puro	+/- 30% del forestal puro	0%
Ejemplos de densidad orientativa máxima objetivo (DOMO) de árboles por ha en función del diámetro a la altura de pecho medios objetivos (DAPMO) buscado y las restricciones de AB de cada categoría de SSP antes mencionados:					
DAPMO 22 cm		579	447	316	
DAPMO 35 cm		229	177	125	

De la interpretación del **Cuadro 1**, surge que, si el objetivo productivo maderero es lograr árboles con DAP de 22 cm, lo que permite alcanzar diámetros sobre corteza del orden de 20 cm a 3 m de altura, se deberá disponer de un máximo de 316 árboles. ha⁻¹ al turno de corta, buscando mantener el potencial de la producción ganadera al 100% de la producción ganadera convencional a “cielo abierto”. En cambio, si el objetivo es lograr una combinación de producción en el cual se eleva el potencial productivo forestal del 30% respecto de una plantación pura al 65% de su potencial (convencional en macizo), se podrá elevar la densidad de individuos a 447 árboles.ha⁻¹, sacrificando el 25% de la producción de carne y así sucesivamente. Más debe comprenderse que, cuando se maneja el SSP en el Grado III, se deberá ser sumamente cuidadoso en el manejo del pastoreo, para evitar situaciones de sobrepastoreo que conllevarían a inducir un posible colapso del sistema. Continuando, si el objetivo es lograr árboles de DAP de 35 cm y mantener la producción ganadera al 100%, es decir un SSP de categoría I que prioriza el componente ganadero, se deberá limitar la densidad final del componente forestal a 125 árboles.ha⁻¹. Finalmente, si se buscan otros compromisos productivos, tolerar 177 árboles. ha⁻¹ (SSP grado II) y 229



árboles. ha^{-1} si la meta es un SSP que pretende maximizar la producción forestal. Cuánto más parecido es el componente forestal del sistema, a una plantación en macizo raleada, más estricto debe serse en la aplicación del indicador AB y, cuánto más anchos son los callejones, más tolerante puede ser la aplicación del AB.

En el caso de disponer de mercados forestales aceptables, para rollos de DAPMO 22 cm, dentro de un prudente radio de distancia SSP - Industrias forestales y de mercados para rollos de árboles de DAP 35 cm, es también posible manejar un raleo comercial (eventualmente dos). Por ejemplo, se podrá arrancar el sistema con 316 árboles. ha^{-1} logrados al segundo o tercer año de implantarse el sistema (luego de un raleo precomercial, si fuese menester) y cuando este alcanzara el grado de ocupación del sitio "AB 10-12 m^2 . ha^{-1} " límite del grado SSP I, entresacar árboles (ralear), dejando no más de 177 árboles. ha^{-1} , si se tolera planificar la tala rasa cuando el sistema alcanza el límite del grado II de 15-17 m^2 . ha^{-1} con un DAPMO de 35 cm.

4. CONCLUSIONES

Es posible alcanzar diferentes metas productivas forestales y ganaderas manejando la densidad de árboles y el grado de sombreado de los SSP, utilizando el indicador indirecto orientativo al "área basal". Para que un SSP sea exitoso, más allá de los cuidados silviculturales y del pastoreo que estos requieren, así como de la existencia de mercados dentro de una prudente distancia a las industrias forestales, es preciso **tener en claro cuál es el objetivo productivo** (proporción de producción forestal y ganadero respecto al sistema puro) buscado y **actuar consecuentemente en tiempo y forma con podas y raleos**. La clasificación propuesta pone de manifiesto la ductilidad de los SSP para responder a diferentes combinaciones de producción forestal y ganadera, en función del manejo del componente arbóreo.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece los aportes de resultados SSP e interpretación participativa de los profesionales y productores que participaron de los proyectos INTA i015 Sistemas Silvopastoriles hacia un manejo sustentable (2019-2023) e i049 "Construcción de conocimientos agroforestales y silvopastoriles" (2023-2027).

6. LITERATURA CITADA

- ABBAS, F.; HAMMAD, H.M.; FAHAD, S.; CERDA, A.; RIZWAN, M.; FARHAD, W.; EHSAN, S.; BAKHAT, H.F.; SALAM, A.; UPPAL, R.S.; DAMALAS, C.A.; RAMAN, H.; ADREES, M.; MAHMOOD, F.; MUNIR, A. 2017. Agroforestry: A sustainable environmental practice for carbon sequestration under climate change scenarios—A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(12): 11177–11191. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8687-0>
- CHARÁ, J.; CAMARGO, J.C.; CALLE, S.; BUENO, L.; EIBL, B.; MURGUEITIO, E.; ARIAS, L.; DOSSMAN, M.; MOLINA, E.J. 2015. Servicios ambientales de sistemas silvopastoriles intensivos. En *Sistemas agroforestales* (pp. 363–380). CIPAV-CATIE.
- COLCOMBET, L.; ESPÍNDOLA, F.; DUTCHEN, N.; ROSSNER, B.; PACHAS, N. 2012. Resultados de un sistema silvopastoril con *Grevillea robusta* en el sur de Misiones (Silvopastoral system results under *Grevillea robusta* in southern Misiones). Actas del II Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles, Ediciones INTA: 147-152
- COLCOMBET, L.; ESQUIVEL, J.; FASOLL, H.; FASSOLA, H.; GOLDFARB, C.; LACORTE, S.; PACHAS, N.; ROSSNER, M.B.; WINK, R. 2015. Los sistemas silvopastoriles en la provincia de Misiones y Corrientes, Argentina. En *Sistemas agroforestales: Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales* (pp. 461–470). CIPAV-CATIE.
- COLCOMBET, L.; PUEYO, J. D.; GÁNDARA, L.; EGOLF, P.; CAVALIERI, J.; ATANASIO, M.; PERNOCHI, L.; LARA, J.; ZIMERMAN, M.; BANEGAS, N.; ROSSNER, M. B.; KIMMICH, G.; LOTO, M.; FERRERE, P., & PANTIÚ, A. (2023). Experiencia ganada con una "Ficha de evaluación rápida de sistemas silvopastoriles". En Memorias del XII Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles, II Congreso de la Red Global de Sistemas Silvopastoriles y IV Seminario Nacional de Sistemas Silvopastoriles. Cali, Colombia. ISBN 978-628-95190-5-1



- GÓMEZ, J. 2019. Los sistemas agroforestales modernos: ¿qué son y cuál es su fundamento? Pp 3-5. En: Dossier Técnico N° 99. Los Sistemas Agroforestales. Departamento de Agricultura, Pesca Ganadería y Alimentación de Cataluña. <https://www.researchgate.net/publication/340538678>
- IMAÑA-ENCINAS, J. (2011). *Mensura dasométrica*. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria [INTA]. (2026). *Manejo de sistemas silvopastoriles bajo plantaciones forestales*. Gobierno de Argentina. <https://www.argentina.gob.ar/inta/tecnologias/manejo-de-sistemas-silvopastoriles-bajo-plantaciones-forestales>
- KAY, S.; GRAVES, A.; PALMA, J.H.N.; ET AL. 2019. Economic evaluation of agroforestry systems. *Ecosystem Services*, 36, 100896. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100896>
- KUMAR, P.; SINGH, R.P.; SINGH, A.K.; KUMAR, V. 2014. *Quantification and distribution of agroforestry systems and practices at global level*. *HortFlora Research Spectrum*, 3(1): 1–6. Disponible en <https://oaji.net/articles/2015/1192-1439694163.pdf>
- LUCCHERINI, S.A.; SUBOVSKY, E.D.; BORODOWSKI, E. 2014. *Sistemas silvopastoriles: Una alternativa productiva para nuestro país*. *Apuntes Agroeconómicos*, 7(8). Sitio Argentino de Producción Animal. Disponible en https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/manejo%20silvopastoril/168-silvopastoril.pdf
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca [MAGyP]. 2025. *Tablero estadístico forestal*. <https://www.magyp.gob.ar>
- MONTAGNINI, F.; SOMARRIBA, E.; MURGUEITIO, E.; FASSOLA, H.; EIBL, B. 2015. *Sistemas agroforestales*. CIPAV-CATIE.
- MURGUEITIO, E.; FLORES, M.X.; CALLE, Z.; BARAHONA, R.; MOLINA, H.; URIBE, F. 2015. Productividad en sistemas silvopastoriles. En *Sistemas agroforestales*.
- MUJICA, G.; PADÍN, M.; A. Mc DERMOT, A.; TRAGONI, M. (2023). Efecto de la sombra de un rodal de *Eucalyptus* en verano, sobre el comportamiento y el peso de terneros al destete en un sistema de cría bovina en el norte de Buenos Aires. En *Sistemas silvopastoriles: Hacia una diversificación sostenible* (pp. 278–282). Montevideo, Uruguay.
- PACHAS, A.N.A.; DEHLE, R.; ESQUIVEL, J.I.; FLEITAS, F.; COLCOMBET, L. 2012. Sistemas silvopastoriles intensivos en Misiones. Resumen. (Intensive silvopastoral systems at Misiones). Actas del II Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles, Ediciones INTA: 191
- PANTIÚ, A.; CAPELLARI, A.; GIMÉNEZ, L.I.; KURTZ, V. 2015. Crecimiento animal en sistemas silvopastoriles. En *Congreso Nacional de Sistemas Silvopastoriles*.
- PERI, P.L.; ROSAS, Y.M.; LADD, B.; TOLEDO, S.; LASAGNO R.S.; MARTÍNEZ, G. 2018. Modelling Soil Carbon Content in South Patagonia and Evaluating Changes According to Climate, Vegetation, Desertification and Grazing.
- PERI, P.L.; DUBE, F.; VARELLA, A. (EDS.). (2016). *Silvopastoral systems in southern South America*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24109-8>
- RADKE, M. M. (2023). Relaciones entre medidas dasométricas e intensidad de luz en SSP con pino híbrido (*Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*) en Misiones [Tesis de grado para optar al título de Ingeniero Agrónomo. FCF-UNaM]. Eldorado, Misiones.
- RUSSO, R. O. (2015). Reflexiones sobre los sistemas silvopastoriles. *Pastos y Forrajes*, 38(2), 157–161.
- SANCHIS COOPER, R. (2025). *Efecto de la densidad arbórea sobre parámetros dasométricos de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden en sistemas silvopastoriles*. [Tesis de grado, Universidad de la República, Centro Universitario Regional Noreste]. Colibrí. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/handle/20.500.12008/54214>
- ZIMERMAN, M.; RE, P.; COLCOMBET, L.; MOLLER, A.; LOTO, M.; SOLÍS, V.; FERNÁNDEZ, R.; LARA, J.; RABELLO, M.; VIANA, A.; WAIDELICH, R. 2025. Condiciones medioambientales asociadas al estrés por calor y al bienestar animal en sistemas silvopastoriles de diferentes regiones de Argentina. En XIII Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles (CISSP), Cuba.



HETEROGENEIDAD FLORÍSTICA Y ESTRUCTURAL DE LA VEGETACIÓN EN TRES SITIOS ECOLÓGICOS DEL ESTABLECIMIENTO EL CARAYÁ, ENTRE RÍOS

Carlos DE LA PEÑA¹, Johanna BAEZ², Lilian ROMAN¹, Giovana ANNONI¹, Federico KEES¹,
Augusto ARANGUI³

RESUMEN

El establecimiento El Carayá, ubicado en el departamento Feliciano (Entre Ríos), representa un ambiente característico del Espinal entrerriano. En este estudio se evaluaron nueve transectas de 200 m, distribuidas en tres sitios ecológicos (SE1, SE5, SE6) utilizando el protocolo MBGI. Se caracterizó la vegetación de los estratos herbáceo, arbustivo y arbóreo mediante la estimación de la riqueza de especies; el índice de diversidad de Shannon; la composición florística y los índices de heterogeneidad horizontal (IHHV) y vertical (IHHV); las diferencias entre sitios se evaluaron mediante análisis de ordenación no métrico multidimensional (NMDS), análisis de varianza multivariado permutacional (PERMANOVA) y análisis de la varianza (ANOVA) de los índices de heterogeneidad. El estrato herbáceo presentó la mayor riqueza específica y diversidad, sin diferencias significativas entre los sitios ecológicos. En contraste, los estratos leñosos mostraron una marcada variabilidad, con menor riqueza de especies arbustivas y arbóreas en el SE1 y un mayor desarrollo del componente leñoso en los SE5 y SE6. El PERMANOVA evidenció diferencias significativas en la composición florística entre sitios ($R^2 = 0,40$; $p = 0,009$), mientras que el NMDS mostró una clara separación entre ellos. Por su parte, los índices de heterogeneidad (IHHV y IHHV) no mostraron diferencias significativas entre sitios (ANOVA; $p > 0,05$), lo que indica que las principales variaciones que se observan pueden estar asociadas a cambios en la composición florística más que a diferencias en la estructura general de la vegetación. Estos resultados ponen de manifiesto la heterogeneidad florística y estructural del Espinal entrerriano y aportan información relevante para orientar estrategias de manejo y conservación de sus bosques.

Palabras clave: *espinal entrerriano; MBGI; comunidades vegetales; diversidad alfa; ordenación multivariada*

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques nativos del Espinal constituyen sistemas de alto valor ecológico, donde la heterogeneidad ambiental asociada a diferencias de suelo, relieve, régimen hídrico e historia de uso determina variaciones en la composición y estructura de la vegetación (Sabattini et al., 2013). Sin embargo, la información sobre cómo estos atributos varían entre sitios ecológicos aún es limitada, lo que dificulta el desarrollo de prácticas de manejo acordes con las características de cada ambiente. En este contexto, la caracterización de la heterogeneidad florística y estructural aporta información clave para el manejo de bosques con ganadería integrada (MBGI), permitiendo identificar ambientes con diferente potencial productivo y de conservación, así como fortalecer las estrategias de monitoreo y manejo sostenible de los bosques nativos (Bestelmeyer et al., 2003, 2017; Carranza et al., 2019).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la heterogeneidad florística y estructural de la vegetación entre tres sitios ecológicos (SE1, SE5 y SE6) del establecimiento El Carayá, considerando los estratos herbáceo, arbustivo y arbóreo.

¹ EEA INTA Concordia- delapena.carlos@inta.gob.ar

² INTA Paraná

³ Consultor independiente



2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en la Estancia "El Carayá", ubicada en el Distrito Atencio (sur del departamento Feliciano), centro-norte de la provincia de Entre Ríos, Argentina. El establecimiento comprende una superficie aproximada de 6.400 ha y se localiza entre los 30°35' y 30°38' S y los 58°48' y 58°56' O. El clima es templado húmedo, con una temperatura media anual de 18,9 °C y una precipitación media anual de 1.300 mm concentrada principalmente entre octubre y marzo (Sabattini, 2019). El área pertenece a la Provincia Fitogeográfica del Espinal (Cabrera, 1976), caracterizada por bosques xerófilos dominados por algarrobo negro (*Neltuma nigra*), ñandubay (*Neltuma affinis*) y espinillo (*Vachellia caven*). Los bosques del Distrito Atencio presentan una elevada heterogeneidad ambiental asociada a diferencias de suelos, relieve y red hidrográfica, lo que determina distintas condiciones de desarrollo de la vegetación y la presencia de diversos estados sucesionales, desde renovales hasta montes maduros (Sabattini et al., 2013). Asimismo, en sectores vinculados a cursos de agua se observa una transición con elementos florísticos de la Provincia Fitogeográfica Paranaense (Sabattini et al., 1999).

2.2. Diseño de muestreo y toma de datos

Se relevaron nueve transectas de 200 m de longitud, distribuidas en tres sitios ecológicos (SE), con tres transectas por sitio. Se entiende por sitio ecológico el conjunto de condiciones abióticas homogéneas donde se desarrolla el bosque (Bestelmeyer et al., 2003, 2017). Los SE fueron delimitados mediante un análisis de gabinete, aplicando la metodología propuesta en el Protocolo para la Identificación de Sitios Ecológicos del Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS, 2022). Posteriormente, las transectas se establecieron siguiendo el protocolo de Monitoreo de Indicadores de Sustentabilidad de Predios con Manejo de Bosques con Ganadería Integrada (MBGI), adaptado de la metodología propuesta por Carranza et al. (2019). En cada transecta se registraron, en planillas de campo, las especies presentes en los estratos herbáceo, arbustivo y arbóreo, así como el porcentaje de cobertura y la altura de cada especie.

Para cada transecta y estrato, se calculó la riqueza específica el índice de diversidad de Shannon (H') y se construyeron los índices de heterogeneidad horizontal (IHHV) y vertical (IHVV) de la vegetación, para 4 estratos diferentes de altura (menor a 2 m., 2-4 m., 4-6 m. y mayor a 6 m.) Posteriormente, se construyó una matriz de composición florística (especies × transectas) y se filtraron las especies presentes en al menos dos transectas.

2.3. Análisis estadístico

Las diferencias en la composición entre SE se evaluaron mediante un análisis de ordenación no métrico multidimensional (NMDS), utilizando la distancia de Bray-Curtis, y una prueba de análisis de varianza multivariado permutacional (PERMANOVA, 999 permutaciones). La homogeneidad de dispersiones entre grupos se verificó con la prueba de betadisper. Finalmente, las diferencias en la riqueza de especies entre sitios se realizaron mediante la prueba de Kruskal-Wallis. Los análisis estadísticos se realizaron en R (R Core Team, 2023) utilizando el entorno RStudio. Los análisis multivariados (NMDS, PERMANOVA y betadisper) se realizaron con el paquete vegan (Oksanen et al., 2022).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estrato herbáceo presentó la mayor riqueza específica (22-42 especies/transecta, Gráfico 1) y diversidad ($H' = 2,5-3,1$), sin diferencias significativas entre sitios (Kruskal-Wallis, $p = 0,90$). En contraste, los estratos leñosos mostraron mayor variabilidad. El SE1 registró una baja riqueza arbustiva (2-3 spp) y arbórea (1-2 spp), mientras que SE5 y SE6 presentaron un mayor desarrollo del componente leñoso (arbustivo: 5-11 spp; arbóreo: 4-8 spp) (Gráfico 1).

El análisis PERMANOVA reveló diferencias significativas en la composición florística entre SE ($R^2 = 0,40$, $p = 0,009$), con homogeneidad de dispersiones (betadisper, $p = 0,55$). El NMDS (stress = 0,076) mostro una clara separación entre los tres sitios. El SE1 se caracterizó por el predominio de *Paspalum*



spp., mientras que en los SE5 y SE6 se registró una mayor representación arbórea como *Myrcianthes cisplatensis*, *Neltuma affinis*, *Celtis pallida* (Gráficos 1-4).

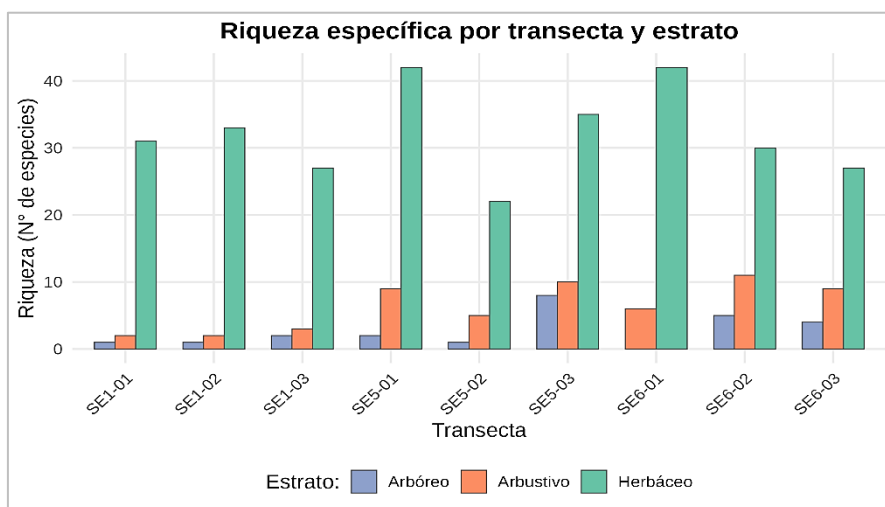


Gráfico 1. Riqueza específica por transecta y estrato en el establecimiento El Carayá.

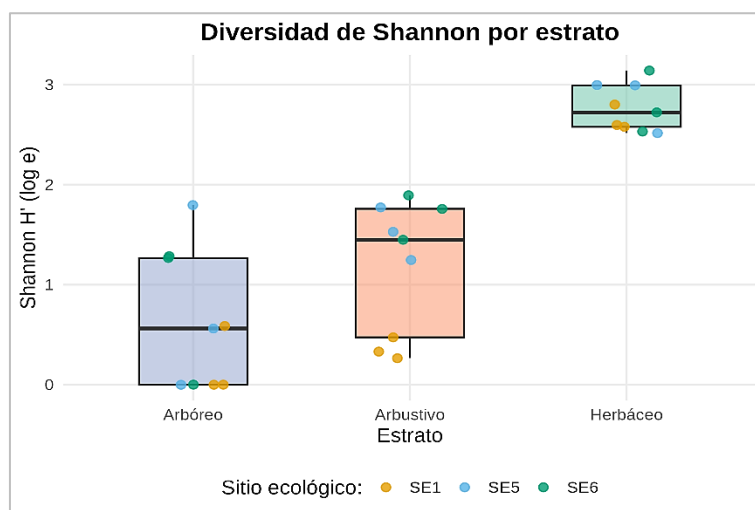


Gráfico 2. Diversidad de Shannon por estrato vegetal. Cada punto representa una transecta.

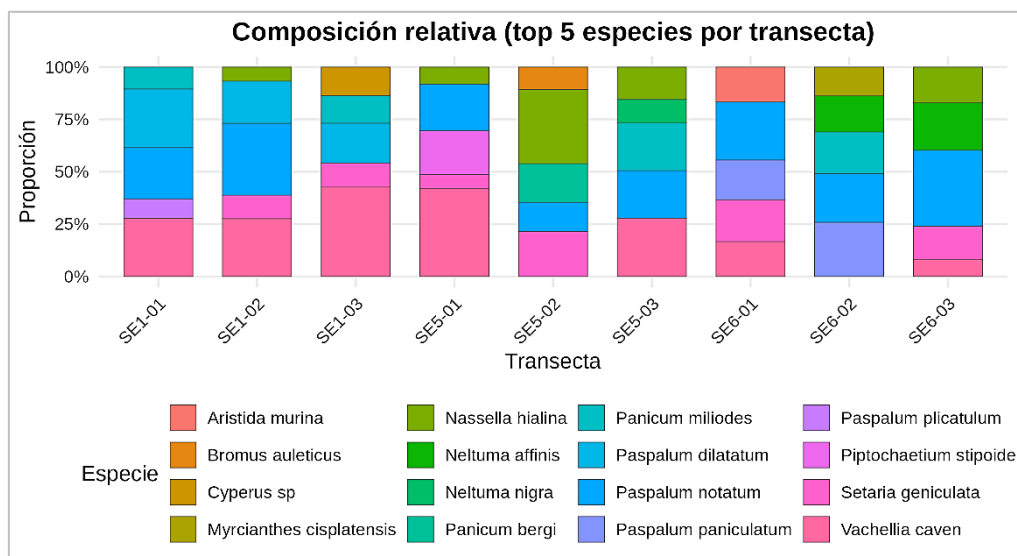


Gráfico 3. Composición relativa de las 5 especies más abundantes por transecta.

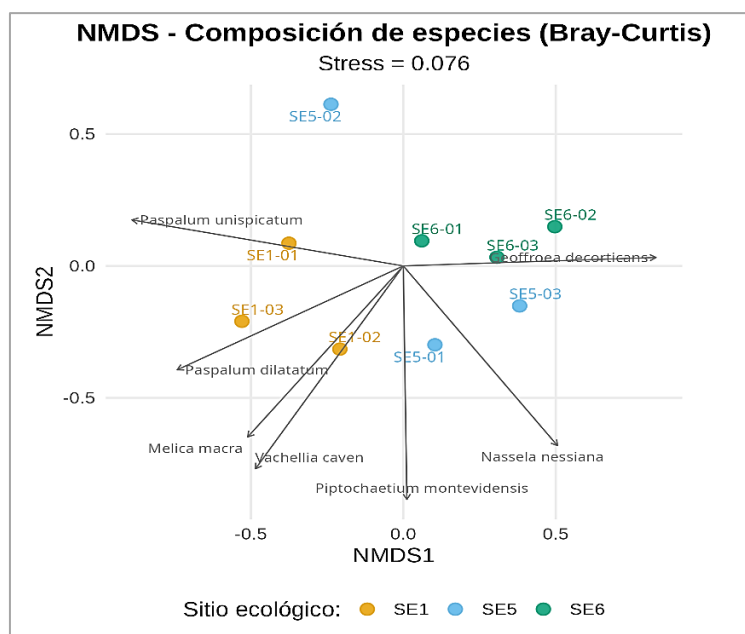


Gráfico 4. NMDS de la composición florística (Bray-Curtis). Colores según sitio ecológico. Flechas: especies más correlacionadas con los ejes (envfit, $R^2 > 0,4$).

En los sitios ecológicos evaluados, los índices de heterogeneidad horizontal (IHHV) y vertical (IHVV) presentaron valores similares (Gráfico 5). El IHHV de estratos varió entre 66,4 y 74,1, mientras que el IHHV total leñoso osciló entre 38,9 y 43,7. El IHVV mostró valores entre 0,50 y 0,59, registrándose el valor medio más alto en SE6. Sin embargo, estas diferencias no fueron significativas para ninguno de los índices analizados (ANOVA, $p > 0,05$).

La elevada riqueza y diversidad del estrato herbáceo reflejan el papel predominante de este componente en los ecosistemas del Espinal. La ausencia de diferencias significativas entre sitios ecológicos sugiere que, a la escala espacial considerada, las condiciones ambientales son suficientemente homogéneas para sostener comunidades herbáceas con niveles de diversidad similares. No obstante, este resultado podría estar parcialmente influenciado por la metodología de muestreo, ya que la longitud de las transectas del protocolo MBGI (200 m) incrementa la probabilidad de registrar un mayor número de especies herbáceas características de estos ambientes.

En contraste, la variabilidad observada en los estratos arbustivo y arbóreo entre los SE sugiere una estructura vegetal característica de ambientes más abiertos, posiblemente influenciada por disturbios recurrentes, como el pastoreo, el fuego o diferencias de suelo. Esto se refleja en el SE1, que presentó una menor riqueza de especies arbustivas y arbóreas, mientras que los SE5 y SE6 mostraron un mayor desarrollo del componente leñoso, con presencia de especies como *Myrcianthes cisplatensis*, *Neltuma affinis* y *Celtis pallida*.

Si bien los objetivos y el diseño del estudio no permiten inferir directamente procesos sucesionales, los patrones observados son compatibles con diferentes estadios de desarrollo de la vegetación leñosa, los cuales podrían reflejar distintas etapas sucesionales. En este contexto, el SE1 representaría un ambiente con menor complejidad estructural, mientras que los SE5 y SE6 evidenciarían un mayor desarrollo del estrato leñoso. Estos resultados coinciden con lo señalado por Sabattini et al. (2013) para los bosques del Distrito del Ñandubay (Espinal entrerriano), donde el uso ganadero histórico, el régimen de incendios, las características del suelo y la posición topográfica constituyen factores que generan un mosaico de comunidades vegetales con diferente composición y complejidad estructural.

En relación con los índices de heterogeneidad horizontal (IHHV) y vertical (IHVV), no se detectaron diferencias significativas entre los sitios ecológicos evaluados (ANOVA, $p > 0,05$), a pesar de las diferencias en los análisis de composición florística realizados. Esto podría explicarse por la elevada variabilidad registrada entre las transectas dentro de un mismo sitio ecológico, lo que evidencia una



marcada heterogeneidad espacial, consistente con la estructura en mosaico característica de los ambientes del Espinal. En este contexto, las diferencias entre sitios se manifestaron principalmente en la composición de especies, mientras que los niveles de heterogeneidad de la vegetación resultaron comparables con la intensidad de muestreo utilizada.

En conjunto, estos resultados ponen de manifiesto la elevada heterogeneidad florística y estructural en el establecimiento El Carayá. La coexistencia de comunidades abiertas dominadas por gramíneas y de sectores con mayor desarrollo leñoso incrementa la diversidad del paisaje y resalta la importancia de implementar estrategias para el manejo y la conservación del Espinal entrerriano.

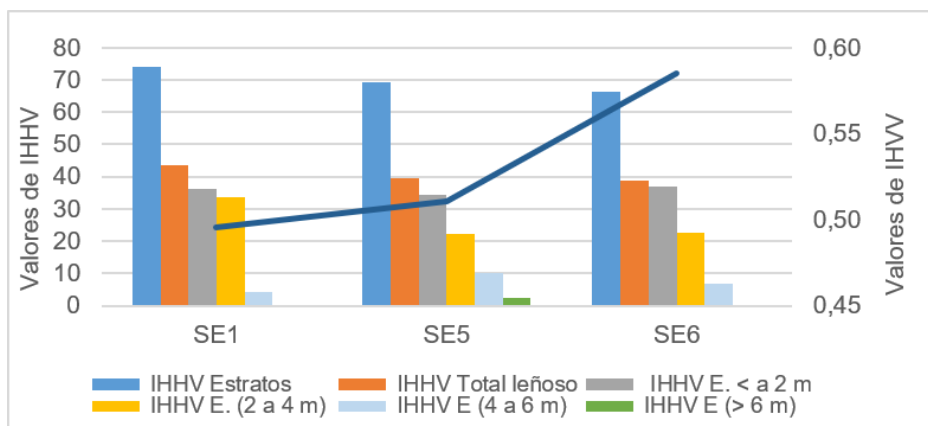


Gráfico 5. Valores medios de los índices de heterogeneidad horizontal (IHHV) y vertical (IHHV) por sitio ecológico

4. LITERATURA CITADA

- BESTELMEYER, B.T.; ASH, A.; BROWN, J.R.; DENSAMBUU, B.; FERNÁNDEZ-GIMÉNEZ, M.; JOHANSON, J.; LEVI, M.; LOPEZ, D.; PEINETTI, R.; RUMPF, L.; SHAVER, P. 2017. State and Transition Models: theory, applications, and challenges. In: Briske, D.D. (Ed.), Rangeland Systems, Springer Series on Environmental Management. Springer International Publishing, Cham, pp. 303–345. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46709-2_9
- BESTELMEYER, B.T.; BROWN, J.R.; HAVSTAD, K.M.; ALEXANDER, R.; CHAVEZ, G.; HERRICK, J. E. 2003. Development and use of state-and-transition models for rangelands. Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives, 56: 114-126.
- CABRERA, A.L. 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, 2(1), 1–85.
- CARRANZA, C.A.; PERI, P.L.; NAVALL, M. 2019. Manual de indicadores para monitoreo de planes prediales MBGI. Región Parque Chaqueño. 92 pp. <https://repositorio.inta.gov.ar/handle/20.500.12123/9046>
- OKSANEN, J.; SIMPSON, G.L.; BLANCHET, F.G.; KINDT, R.; LEGENDRE, P.; MINCHIN, P.R.; O'HARA, R.B.; SOLYMOS, P.; STEVENS, M.H.H.; SZOEC, E.; WAGNER, H.; BARBOUR, M.; BEDWARD, M.; BOLKER, B.; BORCARD, D.; CARVALHO, G.; CHIRICO, M.; DE CACERES, M.; DURAND, S., ... WEEDON, J. 2022. vegan: Community Ecology Package. R package version 2.6-4. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. 2023. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- SABATTINI, J.A. 2019. Área natural protegida Reserva de Usos Múltiples Estancia El Carayá: Producción, conservación y recuperación de ecosistemas en el Espinal Argentino. SocialMedia. ISBN: 978-987-47393-0-8.
- SABATTINI, R.A.; LINARES, S.; SAGRA, J. 1999. Los bosques nativos del centro-norte entrerriano: Problemáticas y manejo sustentable. En El Espinal: Problemáticas y Manejo Sustentable (pp. 53–68). INTA, Paraná.
- SABATTINI, R.A.; LINARES, S.; MARTÍNEZ, F. 2013. Dinámica sucesional del bosque nativo del Espinal entrerriano bajo pastoreo. Revista de Ciencias Agropecuarias, 19(2): 37–48.
- U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS). 2022. National Ecological Site Handbook (Title 190, Parts 630–633). U.S. Department of Agriculture. <https://directives.sc.egov.usda.gov/>



DESARROLLO DE INFORMACIÓN GENÓMICA DE NOVO Y CARACTERIZACIÓN DE DIVERSIDAD GENÉTICA EN PALO AMARILLO (*Phyllostylon rhamnoides*) EN LAS YUNGAS ARGENTINAS

Ramiro C. LEMONGI¹, Pablo A. VERA², Luis F. FORNES³, Ezequiel BALDUCCI⁴, Juan G. RIVAS², Pamela V. VILLALBA², Martín N. GARCÍA², M. Carolina MARTÍNEZ², Susana N. MARCUCCI POLTRI², Natalia C. AGUIRRE^{2*}, Cintia V. ACUÑA^{2*}

RESUMEN

La diversidad genética constituye un componente esencial para definir estrategias de conservación y para la domesticación de especies forestales, aunque la información para muchas especies nativas de Argentina sigue siendo escasa. El objetivo de este trabajo fue desarrollar herramientas genómicas y caracterizar la diversidad genética del palo amarillo, *Phyllostylon rhamnoides*, una especie maderable del pedemonte de las Yungas argentinas. Se analizaron 40 individuos de una población natural. Mediante la metodología de ddRADseq se desarrollaron los primeros marcadores moleculares para la especie, identificándose 39 marcadores SSR y 10.270 SNP de alta calidad. Utilizando los marcadores SNP se estimaron parámetros de diversidad genética, se evaluó la estructura poblacional y se analizaron las relaciones genéticas entre individuos a partir de matrices de distancia (DAS, Nei) y análisis de agrupamiento (NJ). Se evidenció una baja diversidad genética ($H_o = 0,11$) y ausencia de subestructura poblacional. No obstante, los marcadores permitieron discriminar molecularmente a todos los individuos analizados. Adicionalmente, el análisis *in silico* de los loci SSR identificó 16 marcadores polimórficos, de interés para futuros estudios de diversidad genética poblacional. Este estudio constituye la primera caracterización genómica de *P. rhamnoides* y proporciona recursos moleculares novedosos que podrán aplicarse para su conservación, manejo sustentable y monitoreo genético.

Palabras clave: ddRADseq; marcadores SNP y SSR; conservación genética; estructura poblacional

1. INTRODUCCIÓN

La diversidad genética constituye uno de los componentes fundamentales de la biodiversidad y es la base sobre la que actúan los procesos evolutivos y la selección natural. En las especies forestales, la conservación de la variabilidad genética es esencial para mantener la capacidad de adaptación frente a cambios ambientales, perturbaciones y presiones de origen antrópico. A pesar de su importancia, la información genética disponible para la mayoría de las especies nativas de Argentina continúa siendo limitada, dificultando la incorporación de criterios genéticos en programas de conservación, manejo y utilización sustentable.

El palo amarillo (*Phyllostylon rhamnoides*) es una especie arbórea nativa de la selva pedemontana de las Yungas argentinas, reconocida por la calidad de su madera y por su importancia ecológica (SAyDS, 2020). Sin embargo, no se dispone de información genómica ni de herramientas moleculares específicas para realizar estudios genéticos en la especie.

Los avances recientes en secuenciación de nueva generación han permitido desarrollar herramientas genómicas de manera eficiente incluso en especies sin recursos genéticos previos. La técnica de

¹ Universidad Nacional de Moreno. Bs. As. Argentina. lemonramiro33@gmail.com

² Instituto de Agrobiotecnología y Biología Molecular (IABiMo. UEDD INTA-CONICET). Hurlingham. Bs. As. Argentina

³ INTA EEA Famaillá. Tucumán. Argentina

⁴ INTA EECT Yuto. Jujuy. Argentina

* autoría compartida: aguirre.natalia@inta.gob.ar ; acuna.cintia@inta.gob.ar



secuenciación de ADN asociado a sitios de restricción por doble digestión (ddRADseq) se ha convertido en una alternativa ampliamente utilizada para la generación de miles de marcadores SNP (polimorfismo de nucleótido simple) distribuidos a lo largo del genoma (Peterson et al., 2012). Además, con los datos de secuenciación generados, se pueden identificar marcadores moleculares, como los microsatélites (SSR), que continúan siendo ampliamente empleados en genética forestal.

En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo generar por primera vez información genómica en palo amarillo mediante la identificación de marcadores SNP y SSR para caracterizar su diversidad genética y evaluar la existencia de estructura poblacional. La información obtenida constituye un primer paso hacia la incorporación de herramientas genómicas en estudios de conservación, manejo forestal y domesticación de esta especie, además de generar antecedentes que podrán extenderse a otras especies nativas de importancia regional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron 40 individuos de palo amarillo provenientes de una población natural localizada en la finca El Carmen, perteneciente a la empresa Fabril Maderera S.A., ubicada en el departamento de Orán (Salta, Argentina) (23°16'18" S, 64°15'42" O). El ADN genómico se extrajo de hojas jóvenes liofilizadas mediante una versión modificada del protocolo CTAB de Marcucci Poltri et al. (2003), optimizada para la especie. La calidad del ADN se determinó mediante electroforesis en gel de agarosa al 1 % (p/v) y espectrofotometría (NanoDrop 1000) y la concentración mediante fluorometría (Qubit).

La puesta a punto de la técnica de ddRADseq se realizó en la Unidad de Genómica y Bioinformática (UGB) del IABiMo (UEDD INTA-CONICET, INTA Castelar). Para ello, se realizaron pruebas de digestión en dos individuos utilizando dos combinaciones de enzimas de restricción: PstI/MboI y SphI/MboI. Tras la evaluación, se construyeron las bibliotecas ddRADseq definitivas siguiendo el protocolo de Aguirre et al. (2019, 2023). El ADN se digirió con las enzimas que presentaron un patrón de fragmentos adecuado y se ligaron adaptadores con secuencias identificatorias únicas (barcodes) para el multiplexado. Luego, se seleccionaron fragmentos de 400–500 pb y se amplificaron por PCR. La secuenciación se realizó en la plataforma NovaSeq 6000 de Illumina (paired-end, 2×250 pb).

El proceso bioinformático inicial incluyó el demultiplexado y filtrado de las secuencias mediante la herramienta `process_radtags` de Stacks v2.65 (Catchen et al., 2011; Rochette et al., 2019). La calidad de las lecturas fue evaluada con Fastp, FastQC y MultiQC (Chen et al., 2018; Andrews, 2010; Ewels et al., 2016). Ante la ausencia de un genoma de referencia para la especie, se realizó un ensamblado de novo y la búsqueda de SNP con el pipeline `denovo_map` de Stacks, evaluando distintos parámetros. Luego, se aplicaron filtros estrictos de calidad mediante el módulo `populations` (módulo de Stacks) y VCFtools (Danecek et al., 2011). Los criterios aplicados fueron: frecuencia del alelo minoritario (MAF) $\geq 0,05$, ausencia de datos faltantes y una profundidad de lectura (DP) mínima y máxima por región genómica ($11 < DP < 82$). Posteriormente, estos SNP se utilizaron para evaluar la diversidad genética de la población mediante el cálculo de la heterocigosis observada (H_o) y esperada (H_e). La estructura genética se estimó mediante un Análisis de Componentes Principales (PCA) y un Análisis Discriminante de Componentes Principales (DAPC). Para evaluar las relaciones genéticas entre los individuos se calculó la matriz de distancia genética de Nei (Nei, 1972) y se visualizó con un mapa de calor (heatmap). Además, se calculó una matriz de distancia DAS con la cual se construyó un dendrograma mediante Neighbor-Joining. Todos estos análisis estadísticos y representaciones gráficas se ejecutaron en el entorno R (R Core Team), utilizando los paquetes: `vcfR`, `adegenet`, `ape`, `pheatmap` y herramientas complementarias.

Adicionalmente, se realizó una búsqueda de microsatélites (SSR) utilizando el programa MISA (Thiel et al., 2003) a partir de la información generada por el ensamblado de novo. Se diseñaron oligonucleótidos utilizando el programa Primer3 (Untergasser et al., 2012). Para los SSR identificados, se calcularon los siguientes parámetros: H_o , H_e , número de alelos (N_a), contenido de información polimórfica (PIC), coeficiente de endogamia y el equilibrio de Hardy-Weinberg (paquetes `adegenet`, `pegas`).



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La combinación de enzimas PstI/MboI fue seleccionada para la construcción de las bibliotecas ddRADseq por generar la mayor cantidad de fragmentos dentro del rango de tamaño requerido (≈ 500 pb). Los análisis de calidad de secuencias indicaron perfiles homogéneos entre muestras, con distribuciones adecuadas de calidad por base. Luego del filtrado por calidad se retuvo el 84,8 % de las lecturas originales, obteniéndose un total de 191.208.483 lecturas limpias (4.780.212 lecturas promedio por muestra) aptas para los análisis posteriores. Inicialmente, se obtuvieron 89.586 SNP pero tras aplicar filtros de calidad, el conjunto se redujo a 10.270 SNP definitivos. Por otro lado, la búsqueda de SSRs mediante MISA identificó 39 SSR polimórficos compartidos en al menos el 60 % de las muestras, a partir de los cuales se lograron diseñar oligonucleótidos aptos para la detección por PCR para 16 de ellos.

Al calcular la H_o por individuo en base a los 10.270 SNP, se observaron valores moderados y relativamente homogéneos entre muestras, variando entre 0,105 y 0,119 con un promedio de 0,113. Por otro lado, la H_e varió entre 0,123 y 0,144 y el promedio fue de 0,139.

Con el conjunto de 16 marcadores SSR se observó un nivel moderado de polimorfismo por locus, con un N_a que varió entre 2 y 3 (promedio = 2,06) y la H_o osciló entre 0,000 y 0,475 (promedio = 0,072) mientras que H_e presentó valores entre 0,025 y 0,499 (promedio = 0,117). El PIC mostró valores idénticos a los de H_e , lo que refleja una capacidad de discriminación moderada de los marcadores SSR desarrollados. Un total de 5 loci mostraron desviaciones significativas del equilibrio de Hardy-Weinberg ($P < 0,05$).

Al comparar los valores de H_o obtenidos mediante el empleo de SSR y SNP, se observan niveles relativamente bajos de variabilidad genética, a pesar de que los SNP mostraron una proporción ligeramente mayor de individuos heterocigotas. Esta diferencia probablemente se debe a la amplia cobertura genómica proporcionada por los más de 10.000 SNP analizados, en comparación con los 16 loci SSR evaluados. Esta concordancia entre ambos tipos de marcadores se reflejó en los parámetros genéticos poblacionales estimados. Si bien los SNP mostraron valores de heterocigosidad observada (H_o) y esperada (H_e) ligeramente superiores a los obtenidos con los SSR, ambos conjuntos de datos produjeron estimaciones muy similares y positivas del coeficiente de endogamia, con valores de $F = 0,189$ para los SNP y $F = 0,203$ para los SSR. Estos resultados sugieren un exceso de individuos homocigotas respecto de lo esperado bajo las condiciones de equilibrio de Hardy-Weinberg, sin embargo, dado que se desconoce el sistema de apareamiento de la especie, no es posible atribuir este fenómeno a una elevada tasa de autofecundación. En conjunto, ambos tipos de marcadores muestran resultados consistentes, sugiriendo que la población presenta una diversidad genética baja, aunque los SNP ofrecen una descripción más precisa y robusta debido a la gran cantidad de loci evaluados y a la ausencia de datos perdidos en la matriz.

La diversidad genética entre los árboles muestreados se visualizó con un heatmap (Fig. 1 A), en donde cada celda representa la comparación entre un par de árboles. Las celdas azules corresponden exclusivamente a la comparación de cada individuo consigo mismo (identidad genética), las celdas amarillas indican individuos muy similares (0,03 a 0,04), mientras que los colores naranja y rojo representan individuos más diferentes entre sí (0,05 a 0,07). Cabe destacar que los valores de distancia son bajos. En general, se observa una distribución relativamente homogénea de las distancias genéticas, sin grupos claramente definidos, lo que sugiere que la mayoría de los individuos comparten una base genética similar.

El análisis DAPC indicó un número óptimo de grupos $K=1$, lo que evidencia la ausencia de estructura genética discreta dentro de la población analizada. Este resultado fue consistente con el análisis PCA, que mostró una nube compacta de individuos sin agrupamientos definidos (Fig. 1B). Si bien el dendrograma obtenido a partir de los SNPs (Fig. 2) mostró ciertos patrones de agrupamiento entre individuos, la mayoría de los nodos presentaron bajos valores de soporte estadístico.

El dendrograma muestra agrupamientos de individuos que indican una mayor proximidad genética entre ellos, con un fuerte respaldo de los valores de bootstrap (>500). Estos tres análisis sugieren que los individuos evaluados constituyen una población genéticamente homogénea.



En conjunto, la ausencia de agrupamientos claramente definidos y con alto soporte bootstrap en el dendrograma es consistente con la falta de estructura genética observada mediante DAPC, PCA y la matriz de distancias de Nei. Sin embargo, al tratarse de una única población muestreada en 0,6 ha mediante parcelas circulares de 1.000 m² ubicadas en un bosque de aproximadamente 300 ha, el bajo nivel de diversidad genética observado podría estar ligado a su posición geográfica, en el extremo sur de la distribución natural de la especie.

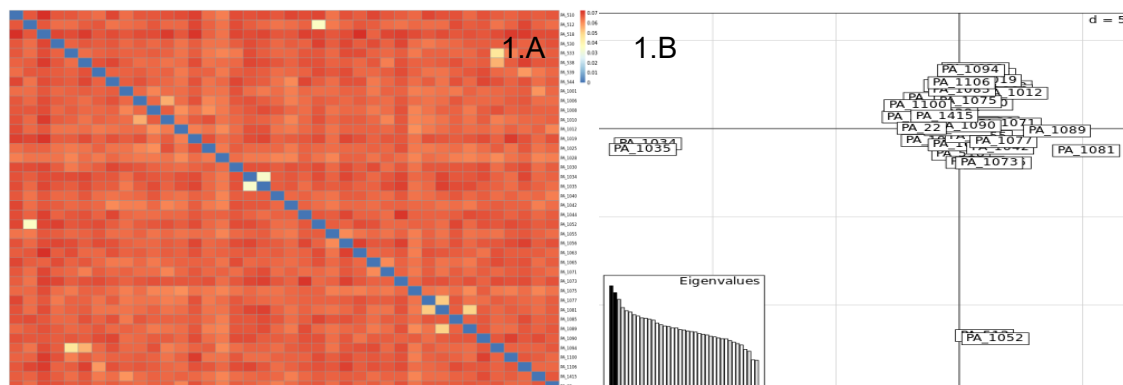


Figura 1. (A) Heatmap de las distancias genéticas de Nei entre los individuos de palo amarillo. Cada celda representa la distancia genética entre un par de árboles, donde las celdas azules se corresponden exclusivamente a la identidad genética mientras que los tonos rojos más oscuros indican mayor distancia genética y los tonos amarillos más claros una menor diferenciación. (B) Análisis PCA.

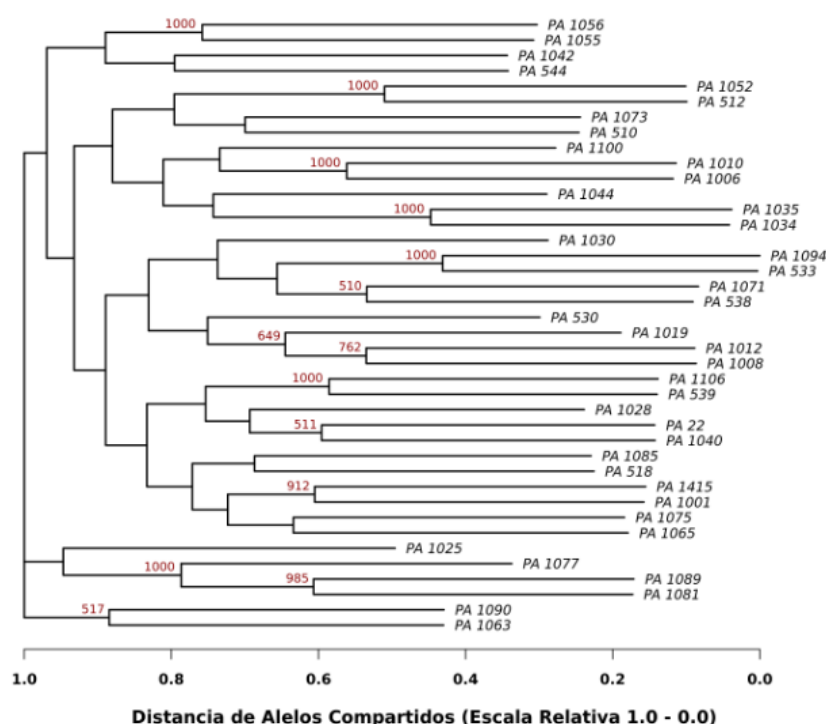


Figura 2. Dendrograma obtenido mediante marcadores SNP para los individuos de palo amarillo. Construido en base a la distancia DAS y agrupamiento por el método Neighbor-Joining. Valores más altos indican un mayor respaldo estadístico para el clúster correspondiente. Los valores numéricos en los nodos corresponden al soporte de bootstrap obtenido tras 1000 réplicas; se muestran únicamente aquellos valores mayores a 500.

Los autores agradecen a Finca El Carmen y Empresa Fabril Maderera por proporcionar el material vegetal utilizado en este estudio.



4. CONCLUSIONES

Este estudio representa la primera aproximación genómica a *Phyllostylon rhamnoides* en una población de la Yungas argentinas. El trabajo contribuye principalmente a la comunidad científica en la generación de recursos moleculares inéditos de gran utilidad para la investigación y gestión de la especie. Los análisis basados en marcadores SNP mostraron resultados altamente concordantes, indicando ausencia de estructura genética poblacional, y los datos obtenidos con SNP y SSR coincidieron en evidenciar una baja diversidad genética en la población evaluada. La información generada constituye una base fundamental para el monitoreo de la variabilidad genética, la definición de estrategias de conservación y manejo de poblaciones naturales, y el desarrollo futuro de programas de mejoramiento y domesticación de esta especie. La información generada sienta las bases para futuros estudios genéticos que incorporen otras poblaciones representativas del área de distribución natural de la especie en Argentina, así como poblaciones de países limítrofes que comparten esta formación boscosa. Finalmente, el enfoque metodológico implementado proporciona un marco de referencia para la generación de recursos genómicos y la caracterización genética de otras especies forestales nativas de interés para el país.

5. LITERATURA CITADA

- AGUIRRE, N.C.; FILIPPI, C.V.; VERA, P.A.; PUEBLA, A.F.; ZAINA, G.; LIA, V.V.; MARCUCCI POLTRI, S.N.; PANIEGO, N.B. 2023. Double Digest Restriction-Site Associated DNA Sequencing (ddRADseq) Technology. *Methods in Molecular Biology* 2638: 37-57.
- AGUIRRE, N.; FILIPPI, C.; ZAINA, G.; RIVAS, J.; ACUÑA, C.; VILLALBA, P.; GARCÍA, M.; GONZÁLEZ, S.; RIVAROLA, M.; MARTÍNEZ, M.; PUEBLA, A.; MORGANTE, M.; HOPP, H.; PANIEGO, N. y MARCUCCI POLTRI, S. 2019. Optimizing ddRADseq in Non-Model Species: A Case Study in *Eucalyptus dunnii* Maiden. *Agronomy* 9(9): 484.
- ANDREWS, S. 2010. FastQC: A Quality Control Tool for High Throughput Sequence Data. Babraham Bioinformatics. Cambridge, Reino Unido.
- CATCHEN, J.; AMORES, A.; HOHENLOHE, P.; CRESKO, W.; POSTLETHWAIT, J. 2011. Stacks: Building and Genotyping Loci de Novo from Short-Read Sequences. *G3: Genes, Genomes. Genetics* 1: 171-182.
- CHEN, S.; ZHOU, Y.; CHEN, Y.; GU, J. 2018. fastp: An Ultra-Fast All-in-One FASTQ Preprocessor. *Bioinformatics* 34(17): i884-i890.
- DANECEK, P.; AUTON, A.; ABECASIS, G.; ALBERS, C. A.; BANKS, E.; DEPRISTO, M. A.; HANDSAKER, R. E.; LUNTER, G.; MARTH, G. T.; SHERRY, S. T.; MCVEAN, G.; DURBIN, R. y 1000 GENOMES PROJECT ANALYSIS GROUP. 2011. The Variant Call Format and VCFtools. *Bioinformatics* 27(15): 2156-2158.
- EWELS, P.; MAGNUSSON, M.; LUNDIN, S. y KÄLLER, M. 2016. MultiQC: Summarize Analysis Results for Multiple Tools and Samples in a Single Report. *Bioinformatics* 32(19): 3047-3048.
- MARCUCCI POLTRI, S. N.; ZELENER, N.; RODRÍGUEZ TRAVERSO, J.; GELID, P. y HOPP, H.E. 2003. Selection of a Seed Orchard of *Eucalyptus dunnii* Based on Genetic Diversity Criteria Calculated Using Molecular Markers. *Tree Physiology* 23: 625-632.
- NEI, M. 1972. Genetic Distance between Populations. *The American Naturalist*. 106 (949): 283-292.
- PETERSON, B.K.; WEBER, J.N.; KAY, E.H.; FISHER, H.S. y HOEKSTRA, H.E. 2012. Double Digest RADseq: An Inexpensive Method for De Novo SNP Discovery and Genotyping in Model and Non-Model Species. *PLoS ONE* 7(5): e37135.
- ROCHETTE, N.; RIVERA-COLÓN, A.; CATCHEN, J. 2019. Stacks 2: Analytical Methods for Paired-End Sequencing Improve RADseq-Based Population Genomics. *Molecular Ecology* 28(21): 4737-4754.
- SAYDS 2020. Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos: Informe Regional Selva Tucumano Boliviana. Buenos Aires, Argentina. Disponible en: [Informe Regional Selva Tucumano Boliviana](#).
- THIEL, T.; MICHALEK, W.; VARSHNEY, R.K. y GRANER, A. 2003. Exploiting EST Databases for the Development and Characterization of Gene-Derived SSR-Markers in Barley (*Hordeum vulgare* L.). *Theoretical and Applied Genetics* 106(3): 411-422.
- UNTERGASSER, A.; CUTCUTACHE, I.; KORESSAAR, T.; YE, J.; FAIRCLOTH, B. C.; REMM, M. y ROZEN, S.G. 2012. Primer3—New Capabilities and Interfaces. *Nucleic Acids Research* 40(15): e115.



SUSCEPTIBILIDAD A ROYA (*Melampsora* spp.) EN CLONES DE ÁLAMO Y SAUCE EN VIVERO

María Victoria GIACHINO¹, Facundo BOTTICELLI², Marcos NICODEMO², Vanesa MEMA³

RESUMEN

En las plantaciones forestales de Salicáceas, el uso de materiales genéticos con buen comportamiento sanitario es la alternativa más económica y práctica para evitar los efectos perjudiciales de las enfermedades foliares. El objetivo fue evaluar la roya (*Melampsora* spp.) de 5 clones de *Populus* (álamo) ('Australiano 129/60', 'Carabelas INTA', 'Guayracá INTA', 'Hovyú INTA', 'Pytá INTA') y 5 clones de *Salix* (sauce) ('Barrett 13-44 INTA', 'Alonzo nigra 4 INTA', 'Geminis INTA-CIEF', 'Lezama INTA-CIEF', 'Yaguareté INTA-CIEF') en vivero. Se utilizó un DBCA, con 3 repeticiones y 10 plantas por parcela y por clon ($n = 300$ plantas). Se midió incidencia y severidad con la escala de Madden et al. (2007) al final del ciclo vegetativo (6 meses). Se compararon los valores mediante pruebas de chi-cuadrado ($p < 0,001$). La incidencia y severidad de la roya mostró diferencias significativas entre los clones de *Salix* ($p < 0,001$). En cambio, la incidencia de roya alcanzó el 100 % en todos los clones de *Populus*. No obstante, entre los clones de *Populus*, se registraron diferencias significativas en la severidad ($p < 0,001$). Estas diferencias son relevantes para la elección de los materiales genéticos en la zona de estudio con una alta incidencia de roya, permitiendo seleccionar aquellos con menor impacto sanitario.

Palabras clave: *Salix* - *Populus* - sanidad

1. INTRODUCCIÓN

Las distintas especies de roya (*Melampsora*) se consideran una de las enfermedades más dañinas para las Salicáceas a nivel mundial (Guinet et al., 2025). Debido a su impacto negativo en la producción forestal, han sido la principal causa del recambio clonal en la región del Delta del Paraná (Cortizo et al., 2011).

Las royas son de hábito nutricional biotrófico, parasitan tejidos jóvenes de plantas vigorosas. Provocan defoliaciones anticipadas durante el verano, aumento de la susceptibilidad al estrés, reducción del crecimiento y pérdida de calidad de la madera producida. Pueden afectar el crecimiento por dos motivos: 1) reducción de la capacidad fotosintética por el daño producido en las hojas y la posterior defoliación y 2) el hongo utiliza nutrientes que no pueden ser traslocados a tallos y raíces para sostener la brotación en la primavera siguiente. De este modo, el consumo de fotosintatos, producen un incremento de las tasas de respiración y transpiración del hospedante. Estas alteraciones fisiológicas se traducen en defoliaciones prematuras de variable intensidad, mermas del 30 al 50 % en el rendimiento de los estaqueros y reducciones del 40 al 60 % en el volumen de madera producida en plantaciones, respuestas que se encuentran condicionadas al material genético evaluado (Cortizo et al., 2011; Mema et al., 2016).

Este detrimento en el crecimiento es una consecuencia directa de la alteración en la dinámica foliar, como la reducción del nivel de fotosíntesis del área foliar remanente, y que repercute tanto en el crecimiento de la temporada actual como en la capacidad de rebrote. Asimismo, el estrés biótico producido por el ataque de este hongo incrementa la susceptibilidad a daños producidos por

¹ Docente del Depto. Tecnología, Universidad Nacional de Luján (UNLu). giachinovictoria@gmail.com

² Estudiante avanzado de Ingeniería Agronómica (UNLu)

³ Docente de la Cátedra de Dasonomía. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.



temperaturas invernales, retraso en la brotación del año siguiente, mayor predisposición a infecciones secundarias de patógenos oportunistas (Cortizo, 2017; Gortari et al., 2019).

En el actual escenario global de especies invasoras y cambio climático, la implementación de prácticas que incorporen la resiliencia de los ecosistemas forestales y el manejo sostenible debe ser priorizada (Villacide et al., 2023). Por ello, el uso de materiales genéticos con buen comportamiento sanitario es la alternativa más económica y práctica para mitigar los efectos perjudiciales de las enfermedades, dado que confiere sustentabilidad al ambiente y es compatible con todas las estrategias de manejo necesarias para una producción eficiente. Sin embargo, debido a que las poblaciones de los patógenos están en constante evolución, la investigación deberá estar orientada a la detección temprana de enfermedades y el desarrollo de clones deberá ser continuo (Cerrillo et al., 2015; Cortizo, 2017).

Para este patógeno, el manejo se restringe a estrategias preventivas basadas en el mejoramiento genético enfocado en la resistencia y al policultivo, debido a que el control químico con fungicidas no resulta económicamente rentable (Crowell et al., 2020). Por consiguiente, el desarrollo de estas plantaciones comerciales dependerá en gran medida del suministro de material genético mejorado que garantice la productividad y sostenibilidad del recurso forestal. En este escenario, tanto la selección de especies y clones adaptados a los requerimientos ambientales actuales como la disponibilidad de una amplia base genética para afrontar los nuevos desafíos emergentes adquieren una importancia fundamental (Casaubón et al., 2014; Cortizo, 2017). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de distintos materiales de *Populus* y *Salix* frente a la roya durante la producción en estaquero.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio: el ensayo se realizó en la Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires, Argentina (34° 35' S y 59° O).

Material vegetal: se utilizaron 5 clones de álamos y 5 clones de sauce provenientes del Vivero Forestal Justo José Baraño que se encuentra en el Campo Experimental de la Universidad Nacional de Luján (UNLu) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Código y nombres de los clones de sauces y álamos

Código	Especie	Clon
S1	<i>S. matsudana</i> x <i>S. alba</i>	'Barrett 13 - 44 INTA'
S2	<i>Salix nigra</i>	'Alonzo nigra 4 INTA'
S6	<i>S. matsudana</i> x ?	'Geminis INTA-CIEF'
S7	<i>S. matsudana</i> x <i>S. nigra</i>	'Lezama INTA-CIEF'
S8	<i>S. alba</i> x ?	'Yaguareté INTA-CIEF'
A1	<i>Populus deltoides</i>	'Australiano 129/60'
A3	<i>Populus deltoides</i>	'Carabelas INTA'
A5	<i>Populus deltoides</i>	'Guayracá INTA'
A8	<i>Populus deltoides</i>	'Hovyú INTA'
A9	<i>Populus deltoides</i>	'Pytá INTA'

Diseño experimental: se utilizó un DBCA con 3 repeticiones. Los tratamientos son 5 clones de cada género. La unidad experimental es una hilera de diez estacas consecutivas de un mismo clon dentro de cada bloque, con un total de 300 plantas. Con una bordura simple de plantas alrededor del ensayo.

Ensayo: se inició el 10/9/25 con estacas de 0,40 m, las cuales se plantaron a 0,20 m entre plantas y 0,70 m entre hileras.

Monitoreo: se realizó quincenalmente durante el ciclo vegetativo (1/11/25 al 15/5/26). Se registraron las variables epidemiológicas de incidencia y severidad para roya (*Melampsora*). La incidencia se cuantificó como el porcentaje de plantas enfermas del total de plantas evaluadas. La severidad se estimó como el porcentaje promedio del área foliar afectada por síntomas de la enfermedad. Para su determinación, se utilizó la escala de severidad de Cole (1981) descripta en Madden et al. (2007). Análisis estadístico:



para el análisis estadístico de incidencia, severidad se tomó la última fecha de monitoreo (15/5/26). Se determinaron los clones de mejor comportamiento ante la enfermedad a través de la comparación de los valores obtenidos de incidencia y severidad mediante pruebas de chi-cuadrado. Se utilizó el software estadístico IBM SPSS versión 32 para los cálculos estadísticos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La incidencia de la roya mostró diferencias significativas entre los clones de *Salix* evaluados ($\chi^2 = 37,661$, $p < 0,001$; Cuadro 2). Se destacó la ausencia total de roya en los clones S1, S7 y S8, comportamiento que corrobora los antecedentes de Cerrillo et al. (2014) y Cerrillo (2022), quienes ya habían descripto un buen comportamiento fitosanitario para enfermedades foliares en estos genotipos. Asimismo, la severidad de la enfermedad presentó una variación significativa entre los materiales ($\chi^2 = 78,105$, $p < 0,001$). El clon S6 exhibió los registros más bajos en ambos parámetros (incidencia y severidad), validando lo reportado previamente por Cerrillo (2022) respecto a su tolerancia a roya. Por el contrario, el clon S2 mostró la mayor severidad y una marcada susceptibilidad al patógeno (*Melampsora*). El aumento de la patogenicidad difiere de lo señalado por Cerrillo et al. (2014), quienes describieron un buen comportamiento sanitario para este material. Esta discrepancia sugiere una posible variación en la respuesta sanitaria del genotipo a lo largo del tiempo o bien una influencia significativa de las condiciones ambientales particulares del presente estudio sobre la interacción patógeno-hospedante.

Los datos obtenidos demuestran una marcada variabilidad en la susceptibilidad de los clones de *Salix* frente a *Melampsora*, lo que confirma que la existencia de materiales con diferente base genética juega un papel determinante en la respuesta o tolerancia al patógeno (Cortizo et al., 2015).

Al contrastar estos hallazgos con los reportados por Crowell et al. (2020), es posible hipotetizar que la superioridad de los clones tolerantes podría estar asociada a atributos morfológicos foliares específicos. Dichos autores establecieron que la densidad de tricomas y de estomas actúan como barreras físicas que contribuyen significativamente a la resistencia contra la roya. Por lo tanto, los materiales seleccionados para sistemas productivos bajo alta presión del patógeno podrían poseer una arquitectura foliar (mayor densidad de tricomas o una configuración estomática específica) restrictiva frente a la infección de roya. Esto no solo valida la importancia de la selección clonal, sino que sugiere la necesidad de incorporar la caracterización morfológica foliar como criterio en los programas de mejoramiento genético de *Salix*.

Cuadro 2. Porcentaje (%) de incidencia y severidad de roya y para los clones de *Salix*

		Clones de <i>Salix</i> (%)				
		S1	S2	S6	S7	S8
Incidencia (%)	Roya	0	100	50	0	0
	0	100	0	50	100	100
Severidad (%)	1-25	0	0	50	0	0
	26-50	0	0	0	0	0
	51-75	0	10	0	0	0
	76-100	0	90	0	0	0

A diferencia de lo observado en *Salix*, la incidencia de roya alcanzó el 100 % en todos los clones de *Populus* (Cuadro 3); estos resultados confirman la alta susceptibilidad de los materiales de *P. deltoides* evaluados en el área de estudio. Pese a que los materiales A1, A3 y A5 fueron descriptos originalmente como tolerantes (Cortizo et al., 2015; Cortizo et al., 2016), la alta incidencia observada constata su susceptibilidad actual. Nuestros resultados concuerdan con lo reportado por Zheng et al. (2019), quienes documentan que la inmunidad previa de *P. deltoides* ante poblaciones nativas de *Melampsora* ha sido superada. No obstante, se registraron entre los clones evaluados diferencias significativas en la severidad de la enfermedad ($\chi^2 = 51,462$, $p < 0,001$). Los clones A3 y A5 registraron la mayor



susceptibilidad (% severidad), mostrando el máximo porcentaje de área foliar afectada. Por el contrario, la menor severidad fue para el clon A9, el cual mostró predominancia de plantas con menor porcentaje del área vegetal afectada por la enfermedad. Finalmente, un comportamiento intermedio de severidad resultó para los clones A1 y A8. Por ello, la variación en los niveles de severidad observada entre los clones A1, A3, A5 y el genotipo A9 sugiere la persistencia de variabilidad genética, la cual constituye una herramienta clave para la selección de genotipos con mayor resiliencia.

Cuadro 3. Porcentaje (%) incidencia y severidad de roya para los clones de *Populus*

		Clones de <i>Populus</i>				
		A1	A3	A5	A8	A9
Incidencia (%)	Roya	100	100	100	100	100
Severidad (%)	0	0	0	0	0	0
	1-25	0	0	0	50	40
	26-50	0	0	0	0	20
	51-75	45	0	32	0	20
	76-100	55	100	68	50	20

Los resultados revelaron diferencias significativas en la susceptibilidad a la roya entre los clones de *Populus deltoides* evaluados. Esta heterogeneidad es consistente con lo reportado por Zhang et al. (2026) respecto a la heredabilidad de este rasgo según la sección botánica: mientras que los ejemplares de la sección *Populus* (*P. alba*) exhiben una alta resistencia, aquellos pertenecientes a la sección *Aigeiros* (*P. deltoides*) y sus híbridos muestran una notable variabilidad en su respuesta, lo que corrobora los niveles de severidad observados en nuestro ensayo.

Otro aspecto crítico para considerar es la influencia de las condiciones microambientales (humedad y temperatura del canopy) como elementos clave en los patosistemas evaluados. De acuerdo con Pinon et al. (2006), en sus investigaciones, la máxima infección de roya se desencadena bajo períodos de humectabilidad foliar continua durante al menos 12 horas. Por otro lado, la capacidad de retención de agua en la superficie de la hoja constituye un rasgo fenotípico clave a incorporar en los programas de mejoramiento de *Populus* para obtener una resistencia duradera a *Melampsora*. Esta característica morfo-anatómica actúa como una barrera física (defensa) de amplio espectro, útil contra diversos patotipos del patógeno. Incorporar las horas de mojado (humectabilidad) foliar en los criterios de selección permitiría mitigar la susceptibilidad observada en condiciones de campo (Pinon et al., 2006) y generar estrategias orientadas a lograr una resistencia durable frente a las variaciones evolutivas del patógeno.

4. CONCLUSIONES

Se determinó una marcada variabilidad genética en el comportamiento frente a la susceptibilidad de roya (*Melampsora* spp.) entre los materiales evaluados de *Salix* y *Populus*.

En *Salix* spp., los clones S1, S7 y S8 se consolidan como materiales promisorios debido a su incidencia nula frente al patógeno, mientras que el clon S6 demostró una tolerancia destacada frente a la alta susceptibilidad del clon S2.

En *Populus* spp., a pesar del quiebre generalizado de la resistencia (100 % de incidencia), el clon A9 exhibió los niveles más bajos de severidad, posicionándose como una alternativa resiliente frente a los clones cultivados en la actualidad A1, A3 y A5.

Estos resultados constituyen una herramienta de alto valor fitosanitario para la optimización de los programas de mejoramiento genético forestal y la toma de decisiones en plantaciones comerciales y de investigación en la región de secano. Nos facilita la toma de decisiones permitiendo diversificar el uso de clones con el objetivo de lograr maximizar la productividad y garantizar la sustentabilidad del recurso.



5. LITERATURA CITADA

- CASAU BÓN, E.; PERI, P.L.; CORNAGLIA, P.S. 2014. Comportamiento dasométrico de guías de álamo en estaquero para la instalación de sistemas silvopastoriles en el bajo Delta bonaerense del río Paraná. Jornadas Salicáceas y IV Congreso Internacional de Salicáceas.
- CERRILLO, T. 2022. Mejoramiento genético para la obtención de clones de *Salix* spp. para el Delta del Paraná y otras regiones del país. Revista MDA, 3(1): 49-55. Ministerio de Desarrollo Agrario de la Provincia de Buenos Aires.
- CERRILLO, T. 2014. Selección de seis nuevos clones de sauce (*Salix* spp) para el Delta del Paraná. In Actas del IV Congreso Internacional de Salicáceas en Argentina, La Plata, Argentina. 12 p.
- CERRILLO, T.; ÁLVAREZ, J.A.; ÁLVAREZ, J.L.; BATTISTELLA, A.; BRACCINI, C.; CASAU BÓN, E.; CEBALLOS, D.; CORTIZO, S.; FERNÁNDEZ TSCHIEDER, E.; FERNÁNDEZ, P.; FAUSTINO L.; FRACASSI, N.; GARCÍA CORTÉS, M.; GONZÁLEZ, A.; GRIECO, L.; HEMMING, A.; LANDI, L.; MANGIERI, V.; MEMA, V.; MONTEVERDE, S.; MUJICA, G.; OLEMBERG, D. 2015. La forestación de salicáceas como aporte al desarrollo sustentable del Delta del Paraná. XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina, 1-14.
- CORTIZO, S.; BOZZI, J.; GRACIANO, C.; GUIAMET, J. 2011. Efecto de la roya sobre el desarrollo de raíces en estaqueros de *Populus deltoides*. En III Congreso Internacional de Salicáceas "Los álamos y los sauces junto al paisaje y el desarrollo productivo de la Patagonia". ISSN: 1850-3543
- CORTIZO, S.; MONTEVERDE, M.S.; REFORT, M.M.; KEIL, G.; ABBATI, N.N. 2015. Guayracá INTA, un nuevo clon de álamo remitido a inscripción en el registro nacional de variedades. XXIX Jornadas. Forestales de Entre Ríos.
- CORTIZO, S.C.; CERRILLO, T.; THOMAS, E.R.; MONTEVERDE, M.S. 2016. *Subprograma Salicáceas (Salix y Populus)*. Ministerio de Agroindustria de la Nación.
- CORTIZO, S.C. 2017. III Jornada Argentina y I Binacionales (Argentina y Uruguay) de Sanidad Forestal, 9 y 11 de agosto, Universidad Nacional de Luján. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/1496>
- CROWELL, C.R.; BEKAURI, M.M.; CALA, A.R.; MCMULLEN, P.; SMART, L.B.; SMART, C.D. 2020. Differential susceptibility of diverse *Salix* spp. to *Melampsora americana* and *Melampsora paradoxa*. Plant Disease, 104(11), 2977–2984. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-20-0718-RE>
- GORTARI, F.; GUIAMET, J.J.; CORTIZO, S.C.; GRACIANO, C. 2019. Poplar leaf rust reduces dry mass accumulation and internal nitrogen recycling more markedly under low soil nitrogen availability and decreases growth in the following spring. Tree Physiology 39 (1): 19–30.
- GUINET, C.; BURONFOSSE, M.; TANGUAY, P.; FREY, P.; IOOS, R. 2025. Development of a new tool to detect *Melampsora medusae* f. sp. *tremuloidae* causing rust disease on *Populus tremuloides*. Plant Disease, 109(4): 792–799. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-24-1477-SC>
- MADDEN L.V.; HUGHES, G.; VAN DEN BOSCH, I. 2007. The study of plant disease epidemics. 2° Ed. The American Phytopathological Society. 421 p.
- MEMA, V., INGALA, L.; SACCO, F. 2016. Estudios de la reacción de los clones de álamo a *Melampsora* y desarrollo de un set de líneas diferenciales para la caracterización de patotipos presentes en el delta del Paraná. En Gingsins, M., Alvarez, G. y Llavallol, C. I. (Comps.). (2016). Investigación forestal 2011-2015: los proyectos de investigación aplicada. Ministerio de Agroindustria, Unidad para el Cambio Rural (UCAR). https://redforestal.conicet.gov.ar/download/proyecto/PIAS20BAJA_con20tapas.pdf
- PINON, J.; FREY, P.; HUSSON, C. 2006. Wettability of poplar leaves influences dew formation and infection by *Melampsora larici-populina*. Plant Disease, 90(2), 177-184. <https://doi.org/10.1094/PD-90-0177>
- VILLACIDE, J.M.; GOMEZ, D.F.; PEREZ, C.A.; CORLEY, J.C.; AHUMADA, R.; RODRIGUES BARBOSA, L.; FURTADO, E.L.; GONZÁLEZ, A.; RAMIREZ, N.; BALMELLI, G.; DIAS DE SOUZA, C.; MARTÍNEZ, G. 2023. Forest Health in the Southern Cone of America: State of the Art and Perspectives on Regional Efforts. Forests, 14(4), 756. <https://doi.org/10.3390/f14040756>
- ZHANG, M.; ZHOU, X.; LI, H.; WEI, H.; XIANG, X.; BAI, Y.; ZHANG, L.; HU, J. 2026. Study on leaf rust resistance in *Populus* germplasm resources based on multimodel GWAS and selective sweep analysis. Plant Disease. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-25-0610-RE>
- ZHENG, W.; NEWCOMBE, G.; HU, D.; CAO, Z.; YU, Z.; PENG, Z. 2019. The First Record of a North American Poplar Leaf Rust Fungus, *Melampsora medusae*, in China. Forests, 10(2), 182. <https://doi.org/10.3390/f10020182>



ESTUDIO DASOMÉTRICO Y ANÁLISIS PRELIMINAR DE MULTIPLICACIÓN DE *Schinus longifolius* EN LA REGIÓN PAMPEANA

Germán M. MILIONE^{1,2}, M. Cecilia ACOSTA^{2,3}, M. Luciana ALCARAZ³, Emiliano RAMOS⁴
Marcos R. PAVÓN^{2,4}

RESUMEN

Con el propósito de generar información sobre especies forestales nativas de Argentina presentes en el centro de la provincia de Buenos Aires se describieron dos alineaciones de *Schinus longifolius* y se evaluaron las condiciones para su propagación sexual y asexual. Inicialmente, se realizó un inventario forestal junto con un análisis de imágenes satelitales del período 2003–2023. Luego, se evaluó la propagación por estacas tratadas con diferentes concentraciones de ácido indolbutírico (IBA: 0, 2000 y 4000 mg/L) y la germinación de semillas sometidas a pretratamientos con agua caliente o ácido sulfúrico concentrado. Los rodales estudiados muestran un avance espontáneo atribuido a zoocoria por aves, evolucionando desde unos pocos ejemplares de gran diámetro hasta distribuirse en dos alineaciones con $8,3 \pm 4,8$ cm de DAP y $4 \pm 1,3$ m de H promedio. El uso de IBA en la propagación vegetativa, resultó en escaso enraizamiento y no presentó diferencias claras entre tratamientos. La propagación por semillas presentó una emergencia máxima del 4 %, debido a que la mayoría de las semillas recolectadas estaban vacías. Se concluye que la especie presenta un proceso activo de expansión natural y se requiere profundizar los estudios sobre técnicas de propagación para favorecer su producción y conservación.

Palabras clave: reproducción, árbol nativo, inventario forestal

1. INTRODUCCIÓN

La deforestación y degradación de las masas forestales constituye una de las mayores amenazas para el equilibrio ecológico de todo el planeta, una situación considerada de emergencia desde hace más de dos décadas (Montenegro et al., 2004). Desde el primer dato generado por el gobierno en 1916, donde el territorio argentino poseía aproximadamente 100 millones de hectáreas de bosques nativos (Demaio et al., 2021), hasta el Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos del año 2022, se registró una pérdida de 53,7 millones de hectáreas (MADS, 2022). La región pampeana no es ajena a esto y se encuentra entre los biomas con mayores niveles de degradación del país (Burkart, 2006). Particularmente, la provincia de Buenos Aires cuenta con escasa presencia de formaciones leñosas nativas y, en su región central, los registros de árboles nativos son escasos y de origen incierto. A pesar de su comprobada y diversa aptitud para la provisión de bienes y servicios, los árboles nativos de Argentina sólo han sido integrados de forma incipiente a los sistemas de producción agropecuaria (Marino et al., 2008). En este sentido, la bibliografía sugiere la necesidad de incrementar los estudios enfocados en especies de hábito arbóreo, dado que su impacto en la comunidad posiblemente sea mayor que aquellas con ciclo de vida corto (Cordell et al., 2009). En consonancia con esta realidad, relevamientos preliminares en zonas rurales del partido de Azul y Olavarría, permitieron identificar rodales de especies arbóreas nativas tales como *Solanum granuloso-leprosum*, *Vachellia caven*, *Schinus longifolius* y *Celtis tala*, especies cuya distribución original corresponde a las ecorregiones del Espinal y del Delta e Islas del Paraná (Demaio et al., 2021). Particularmente, *Schinus longifolius* (Lindl.) Sp. es un árbol perennifolio, polígamo-dioico, de 3-5 m de altura, marcadamente ramificado, con

¹Dasonomía. Facultad de agronomía (UNICEN). E-mail: gmilione@azul.faa.unicen.edu.ar

²Vivero de Nativas. Facultad de agronomía (UNICEN).

³Fisiología vegetal. Facultad de agronomía (UNICEN).

⁴Estudiante del profesorado en ciencias biológicas. Facultad de agronomía (UNICEN).



ramas espinosas y copa irregular. Si bien su fuste presenta dimensiones escasas, su madera ha sido empleada en carpintería para la fabricación de muebles, mientras que su corteza y hojas, ricas en taninos, se utilizan para curtir cueros (IRUPE, 2020). Asimismo, posee cualidades que lo hacen apto para su uso en cortinas forestales, montes de sombra y reparo para el ganado (Milione y Acosta, 2026).

Con el propósito de generar información sobre especies forestales nativas de Argentina presentes en el partido de Azul (centro de la provincia de Buenos Aires), este trabajo plantea caracterizar dos alineaciones de *Schinus longifolius* a través de variables dasométricas, interpretación de imágenes satelitales y avanzar en estudios preliminares de multiplicación que sienten las bases para el diseño de futuras acciones y estrategias de manejo, producción y conservación de la especie.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en dos alineaciones en sentido N-E de *Schinus longifolius* ubicadas en la región Pampeana, subregión Pampa Deprimida, en las proximidades de las coordenadas 36°48'20.13"S; 59°54'34.41"O. Ambos rodales se encuentran paralelos a los alambrados perimetrales de un camino rural, sobre un complejo de suelos descritos como Natracuoles típicos y Natracualfes típicos, según las cartas de suelo INTA - CIRN (2023). El clima es templado, con una temperatura media anual de 14,4 °C y el régimen de precipitaciones posee una distribución isohigro, con una media de 848,3 mm (Centro Regional de Agrometeorología UNCPBA, 2017).

Análisis de imágenes satelitales e inventario forestal

En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo de la expansión de los rodales desde el año 2003 al 2023 mediante el uso de imágenes satelitales (Google Earth Pro 7.3.6., 2025) (Figura 1). Luego, durante el mes de junio del 2024, se los caracterizó y realizó un inventario forestal midiendo el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) con cinta diamétrica (Forestry Suppliers, Inc. de 7,5 m) y la altura (H, m) mediante una pértiga telescópica (Hastings, modelo 2144) de todos los árboles vivos. Se consideró como pie individual a todos aquellos fustes mayores de 3 cm de diámetro y para cada variable se calcularon valores medios y desvíos estándar.



Figura 1. Sitio de estudio. A) Azul, Buenos Aires (Google Earth Pro 7.3.6., 2025). En el extremo izquierdo con círculo amarillo se indica la ubicación y coordenadas del lugar de estudio. B) Rodales desde 2003 a 2023, donde "a" primera alineación y "b" alineación joven. C) Momento de medición de los rodales (2024).

Evaluación preliminar de multiplicación asexual y sexual

En agosto del 2023, se seleccionaron al azar 13 ejemplares de los cuales se obtuvieron estacas de 20 cm de longitud provenientes de ramas de aproximadamente 1 año. Estas estacas se clasificaron según



la sección de origen en: porción superior ($1,54 \pm 0,44$ cm de diámetro) y porción inferior ($2,4 \pm 0,5$ cm de diámetro). Se utilizó un diseño en bloques completamente al azar con arreglo factorial 2×3 (porción de la rama y dosis de IBA), con un total de 120 estacas. Para controlar la variación ambiental por gradiente de radiación se dividió en dos bloques físicos de 60 estacas cada uno, según la proximidad a un sector más sombreado por vegetación (Bloque 1: mayor sombra; Bloque 2: menor sombra). Se realizó una inmersión rápida en IBA (ácido indolbutírico) en solución acuosa, y se las plantó a campo utilizando 10 estacas por tratamiento y bloque en dosis de 0 (control), 2000 y 4000 mg/L (Dutra et al. 2021). El ensayo fue regado con 80 L de agua (homogéneamente con 40 l por bloque) utilizando una regadera de 10 litros una vez por semana. Se midió la emisión de brotes aéreos diariamente por 50 días, momento en el cual se extrajeron las estacas para evaluar la presencia / ausencia de raíces (Figura 2A).

Durante febrero del 2024 se colectaron frutos maduros cada 10 metros en ambas alineaciones. Posteriormente los mismos se limpiaron con una malla de alambre y las semillas extraídas se sometieron a tres pretratamientos germinativos típicos para superar cubiertas duras (Eynard et al., 2020): inmersión en agua a 70°C y posterior enfriamiento gradual durante 3 horas e inmersión en ácido sulfúrico (98%) por 1 minuto y 5 minutos (enjuagadas con agua corriente) y un control. Finalmente, se sembraron sobre arena en cámara de germinación a 20°C con y sin fotoperíodo (12 h), en tres réplicas de 25 semillas por condición lumínica y tratamiento. Constituyendo así un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2×4 . Se registró la emergencia por 60 días y al finalizar el ensayo se inspeccionaron semillas no germinadas (Figura 2C).

3. RESULTADOS y DISCUSIÓN

Análisis de imágenes satelitales e inventario forestal

Los rodales bajo estudio son disetáneos y carecen de manejo silvícola (podas y raleos). La vegetación herbácea de los alrededores se encuentra dominada por gramíneas y pastoreada ocasionalmente por vacas y/o caballos. Al analizar las imágenes satelitales, se observa una paulatina y clara expansión de la superficie ocupada, desde unos pocos ejemplares hacia el año 2003 en una única alineación “a” con más de 22 años, hasta la aparición de los primeros individuos espontáneos en la alineación “b” y dentro de la misma “a” hacia el año 2013 (Figura 1). Esta expansión en forma lineal y siempre cercana a los alambrados puede deberse a la zoocoria generada por aves, tal como se menciona en Muriello et al., 1993 y Pozo Inofuentes & Säumel, 2022. Los parámetros resultantes del inventario forestal indican que la alineación “a”, conformada por 24 individuos, posee una extensión de 183 m lineales, un DAP (diámetro promedio a 1,30 m) de $8,3 \pm 6,4$ cm distribuido heterogéneamente en unos pocos individuos de gran diámetro acompañados por muchos juveniles, un DAPm (diámetro máximo a 1,30 m) de 66,8 cm y una H (altura promedio) de $4 \pm 1,4$ m. Mientras que la alineación “b”, con 64 individuos más jóvenes y homogéneos, se extiende por 190 m lineales y posee un DAP de $8,3 \pm 3,3$ cm, un DAPm de 17,8 cm y una H de $4 \pm 1,2$ m. Al considerar los individuos de ambas alineaciones juntas el DAP fue de $8,3 \pm 4,8$ cm y la H de $4 \pm 1,3$ m.

Evaluación preliminar de multiplicación asexual y sexual

El registro de brotes aéreos en las estacas no evidenció un claro efecto de las dosis de IBA, sin embargo, se observó una mayor tendencia a la emisión de brotes aéreos en los tratamientos con IBA respecto al control. Asimismo, esta respuesta resultó independiente de la porción de la rama de la cual se obtuvo la estaca. Por otro lado, solo se constató la formación de raíces en 6 de las 120 estacas evaluadas, sin una tendencia clara entre los tratamientos (Figura 2B). Así, la producción de brotes aéreos no se correspondió con la producción de raíces y la dosis de IBA, cuestión planteada por otros estudios sobre especies leñosas nativas (Doll et al., 2013) lo que alienta a seguir profundizando en estos aspectos.

Las semillas provenientes de los diferentes pretratamientos germinativos no manifestaron promoción de la emergencia en ninguna de las condiciones evaluadas luego de 60 días. La máxima emergencia registrada (4%) fue en la condición de remojo en agua y en presencia de fotoperíodo. La inspección

final evidenció que la mayoría de las semillas estaban aparentemente firmes y, en algunos casos, cubiertas por moho. Si bien la bibliografía sobre la reproducción sexual de esta especie es escasa, Rodríguez (2024) reportó porcentajes de hasta el 50% en cultivo *in vitro* con giberelinas, aspecto no coincidente con lo aquí registrado. Finalmente, las semillas no germinadas provenientes de todas las condiciones probadas fueron sometidas a la prueba de flotación, lo cual determinó que sólo un 3% estaban llenas y el 97% restante vacías. Ambas condiciones seminales se corroboraron con corte bajo lupa (Figura 2D). El bajo porcentaje de emergencia obtenido en todas las condiciones se atribuyó a que las semillas colectadas se encontraban mayormente vacías (vanas), probablemente por el ataque de insectos, como se ha descripto para semillas de otras especies arbóreas (López-Mora et al., 2021). Por lo tanto, resulta indispensable considerar el momento de colecta del fruto y realizar la técnica de flotación de semillas para garantizar el trabajo con semillas potencialmente viables. La falta de información disponible para la multiplicación de esta especie y los resultados obtenidos, destacan la importancia de continuar estudiando técnicas de reproducción en especies leñosas nativas que contribuyan a su conservación (Eynard et al., 2020).

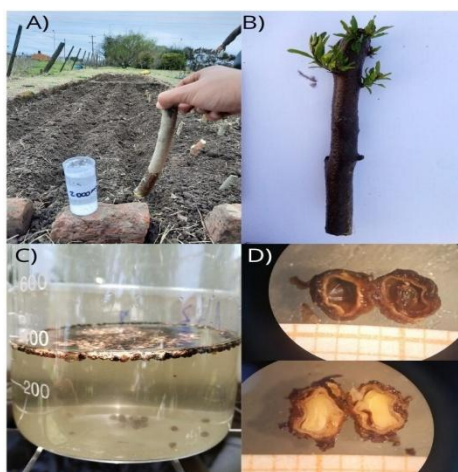


Figura 2. Multiplicación de *S. longifolia*. A) Estaquero en el Jardín Botánico Edgardo N. Orfila (Azul, Buenos Aires). B) Brotes aéreos de estacas a los 50 días. C) Técnica de flotación con semillas no germinadas. D) Corte transversal de semillas vacías (superior) y llenas (inferior).

4. CONCLUSIONES

Los rodales estudiados presentan un proceso activo de expansión espontánea a lo largo de dos décadas. La colonización estrechamente vinculada a los alambrados respalda la zoocoria por aves como el principal mecanismo de dispersión en el paisaje, evidenciando una transición temporal desde unos pocos ejemplares más antiguos y de mayor diámetro, hacia una nueva alineación más densa con individuos jóvenes en pleno establecimiento. Los primeros intentos de multiplicación sexual y asexual no resultaron efectivos, siendo necesario profundizar en el estudio de técnicas de propagación que consideren la fenología de la especie, el momento óptimo de cosecha y la selección cualitativa del material seminal, con el fin de estandarizar protocolos que favorezcan su producción y conservación.

5. AGRADECIMIENTO

Al Jardín Botánico Edgardo N. Orfila de la Facultad de Agronomía de Azul, por el espacio brindado para la realización del ensayo de reproducción asexual. A los estudiantes de Ingeniería Agronómica de la Facultad de Agronomía de Azul; Ceferino Pizzo, Tomás Aguirre, Máxima Berón y Franco Correa, quienes realizaron la inspección final de las semillas no germinadas de *S. longifolius*.

6. LITERATURA CITADA

BURKART, R. 2006. Las Áreas Protegidas de la Argentina. En: Brown, A., Martínez Ortíz, U., Acerbi, M., Corcuera, J. (eds.). La Situación Ambiental Argentina 2005. Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires, Argentina, pp 399-403-DEMAIO, P.; KARLIN, U.O.; MEDINA, M. 2021. Árboles nativos de Argentina: tomo III Noroeste. Editorial Ecoval. 1a ed. 416p. ISBN 978-987-4003-75-1



- CENTRO REGIONAL DE AGROMETEOROLOGÍA UNCPBA. 2017. Registros climáticos de 1992 a 2017, Estación Agrometeorológica del Centro Regional de Agrometeorología, dependiente de la Facultad de Agronomía de Azul (UNCPBA). Disponible en: <http://www1.faa.unicen.edu.ar/centro/centroreg.php>
- CORDELL, S.; OSTERTAG, R.; ROWE, B.; SWEINHART, L.; VASQUEZ RADONIC, L.; MICHAUD, J.; COLLEEN COLE, T.; SCHULTEN, J.R. 2009. Evaluating barriers to native seedling establishment in an invaded Hawaiian lowland wet forest. *Biological Conservation* 142(12): 2997-3004. DOI: 10.1016/j.biocon.2009.07.033.
- DEMAIO, P.; KARLIN, U.O.; MEDINA, M. 2021. Árboles nativos de Argentina: tomo III Noroeste. Editorial Ecoval. 1a ed. 416p. ISBN 978-987-4003-75-1
- DOLL, U.; NORAMBUENA, C.; SÁNCHEZ, O. 2013. Efecto de la aplicación de IBA sobre el enraizamiento de estacas en seis especies arbustivas nativas de la región mediterránea de Chile. *Idesia (Arica)*, 31(3), 65-69. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162015000400020
- DUTRA, F.B.; FRANCISCO, B.D.; ALMEIDA, L.S.; SANTOS, I.P.; VIVEIROS, E.; MARTINS, R.P.; PASSARETTI, R.A.; PIÑA-RODRIGUES, F.C.; SILVA, J.M. 2021. Minicutting technique and IBA application in vegetational propagation of *Schinus terebinthifolia* Raddi. *Research, Society and Development* 10(14), e553101422610. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.22610>
- EYNARD, C.; CALVIÑO, A. A.; ASHWORTH, L. 2020. Cultivo de plantas nativas. Propagación y viverismo de especies de Argentina central. Editorial Ecoval.
- GOOGLE EARTH PRO 7.3.6. 2025. 36°48'20.13"S ; 59°54'34.41"O. Image Airbus. [Online] Available.
- MADS 2022. Segundo inventario nacional de bosques nativos (INBN2). Informe nacional, Buenos Aires, Argentina. 111 p.
- INTA – CIRN. 2023. Cartas de Suelos República Argentina - Provincia de Buenos Aires (2.0) [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7837681>
- IRUPE. 2020. Banco de imágenes de la flora nativa. Universidad Nacional Del Litoral. Esperanza, Santa Fe, Argentina. Disponible en: <https://www.fca.unl.edu.ar/prodocova/IRUPE/index.html>
- LÓPEZ-MORA J. F.; ISIORDIA-AQUINO, N.; LUGO-GARCÍA, G. A.; FLORES-CANALES, R. J.; REYES-OLIVAS, A.; ACUÑA-SOTO, J. A. 2021. Brúquidos (Insecta: Coleoptera) asociados a semillas de fabáceas en el Norte de Sinaloa, México. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie)*, 37, 1-9. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0065-17372021000100105&script=sci_arttext
- MADS. 2022. Segundo inventario nacional de bosques nativos (INBN2). Informe nacional, Buenos Aires, Argentina. 111 p.
- MARINO, G. D.; MAS, M. V.; ORLANDONI, M. J. 2008. Morfología y reconocimiento de las principales especies leñosas nativas de la provincia de Santa Fe, Argentina, en el estado de plántula. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 43(1-2), 67-81.
- MILIONE, G. M.; ACOSTA, M. C. 2026. Árboles nativos de Argentina: uso y adaptación en el centro-sur de la provincia de Buenos Aires. *Revista Argentina Forestal*. Disponible en: <https://www.argentinaforestal.com/2026/04/29/arboles-nativos-de-argentina/>
- MONTENEGRO, C.; GASPARRI, I.; MANGHI, E.; STRADA, M.; BONO, J.; PARMUCHI, M. G. 2004. Informe sobre deforestación en Argentina. Dirección de Bosques. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- MURRIELLO, S.; ARTURI, M.; BROWN, A. D. 1993. Fenología de las especies arbóreas de los talaes del este de la Provincia de Buenos Aires. *Ecología Austral*, 3(1), 025–031. Recuperado a partir de https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1714
- POZO INOFUENTES, P.; SÄUMEL, I. 2022. Nurse species facilitate persistence of dry forests in agricultural landscapes in Uruguay. *Journal of Vegetation Science*, 33, e13127. <https://doi.org/10.1111/jvs.13127>
- RODRÍGUEZ, C. 2024. Efecto de bacterias promotoras del crecimiento vegetal en la germinación in vitro de *Schinus longifolia* "molle" [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Luján]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Luján. <https://ri.unlu.edu.ar/server/api/core/bitstreams/32a47d4b-709a-4c2a-b23a-11560e51d327/content>



GERMINACIÓN, VIABILIDAD Y CONSERVACIÓN DE SEMILLAS DE *Solanum granulosum-leprosum* COMO APORTES PARA SU REPRODUCCIÓN

M. Luciana ALCARAZ¹, M. Cecilia ACOSTA^{1,2}, Máxima BERÓN COSENTINO³, Germán M. MILIONE^{2,4}, Marcos R. PAVÓN^{2,5}

RESUMEN

Solanum granulosum-leprosum es una especie nativa de interés ecológico y ornamental, con escasa información de su germinación y conservación de semillas. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de diferentes formas de acondicionamiento y del lavado de las semillas sobre la germinación, así como analizar cambios en su viabilidad durante el almacenamiento. Además, se evaluó el efecto de la fluridona, un inhibidor de la biosíntesis de ácido abscísico (ABA), sobre la germinación. Se obtuvieron bajos porcentajes de germinación en ausencia de tratamientos promotores y sin diferencias entre formas de acondicionamiento ni por el lavado de las semillas. La luz resultó indispensable para la germinación. La aplicación de fluridona incrementó el porcentaje final de germinación, aunque no modificó su inicio. Las semillas limpias y secas conservaron su viabilidad durante al menos tres meses de almacenamiento en heladera, mientras que las almacenadas dentro de los frutos evidenciaron un deterioro progresivo. Los resultados respaldarían la participación del ABA en la regulación de su germinación, además permiten recomendar el almacenamiento de semillas limpias y secas en heladera como estrategia para su conservación.

Palabras clave: *fumo bravo, dormición fisiológica, fluridona, almacenamiento de semillas, especie nativa*

1. INTRODUCCIÓN

Solanum granulosum-leprosum Dunal, conocido como fumo bravo, es un árbol nativo de pequeño porte (2-12 m de altura), que ocasionalmente presenta hábito arbustivo (Flora Argentina, 2025; Milione et al., 2021). Posee hojas simples y pubescentes, inflorescencias con numerosas flores de corola estrellada y frutos en baya que cambian de verde a amarillo-anaranjado durante la maduración (Cabrera, 1979; Flora Argentina, 2025). Florece desde la primavera hasta el otoño y fructifica entre el verano y el otoño, siendo un importante recurso para aves frugívoras, murciélagos y roedores que dispersan sus semillas (Aves Argentinas, 2025; Baskin y Baskin, 2026; Ricardo, 2013). Además, presenta interés ornamental y se recomienda para espacios verdes rurales y urbanos debido a su tolerancia a condiciones edáficas restrictivas (Milione y Acosta, 2026).

Se distribuye desde el sur de Brasil, Paraguay y Uruguay, y nordeste de Argentina hasta la provincia de Buenos Aires, donde se registraron rodales en las inmediaciones de Olavarría (Flora Argentina, 2025; Milione y Acosta, 2026).

Dada la importancia ornamental y ecológica de esta especie, y la escasa información de sus requerimientos germinativos, resulta importante indagar en los mecanismos que la regulan.

Pendleton et al. (2010) encontraron que *S. granulosum-leprosum* presenta una germinación lenta debido a la restricción mecánica impuesta por el endospermo micropilar, característico de semillas con dormición fisiológica (Bewley et al., 2013; Finch-Savage y Leubner-Metzger, 2006). El debilitamiento

¹ Fisiología Vegetal. Facultad de Agronomía (UNICEN). E-mail: mlalcaraz@azul.faa.unicen.edu.ar

² Vivero de Nativas. Facultad de Agronomía (UNICEN).

³ Estudiante Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía (UNICEN).

⁴ Dasonomía. Facultad de Agronomía (UNICEN).

⁵ Estudiante Profesorado de Ciencias Biológicas. Facultad de Agronomía (UNICEN).



del endospermo puede ser promovido por las giberelinas e inhibido por el ácido abscísico (Finch-Savage y Leubner-Metzger, 2006). Por otro lado, Ricardo (2013) demostró que la remoción de la pulpa favorece la germinación, ya que las semillas limpias, tanto manualmente como tras el paso por el tracto digestivo de *Carollia perspicillata*, alcanzan mayores porcentajes y velocidades de germinación que las contenidas en frutos intactos, evidenciando que el beneficio de la dispersión por murciélagos se debe a la eliminación de la pulpa y no a procesos de escarificación digestiva. Asimismo, este autor sugiere que la pulpa podría contener sustancias inhibitoras para la germinación. Estudios preliminares realizados en 2024 mostraron variación en la germinación según si las semillas fueron extraídas directamente de frutos maduros o de semillas conservadas en heladera y sugieren una pérdida de capacidad germinativa y viabilidad luego de seis meses de almacenamiento.

Con el fin de contribuir al conocimiento de la reproducción por semillas y la conservación de *S. granulolum-leprosum*, se evaluó la respuesta germinativa de semillas sometidas a dos formas de acondicionamiento (fruto o semilla seca), con y sin lavado previo. Además, se describieron los cambios en la viabilidad durante tres meses de almacenamiento bajo ambas condiciones de acondicionamiento.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta de frutos, acondicionamiento y almacenamiento de las semillas

En marzo 2026 se cosecharon frutos maduros de rodales naturales ubicados en los márgenes de caminos rurales en la localidad de Sierras Bayas (partido de Olavarría, Bs. As.). Una parte de estos frutos se conservó en heladera dentro de recipientes plásticos, asegurándose la aireación de estos y, a medida que se fueron realizando los ensayos en el tiempo (ver más abajo), las semillas fueron extraídas aplastando el fruto sobre un papel toalla (tratamiento de semillas recientemente limpias: RL). Otra tanda de frutos se limpió inmediatamente luego de la cosecha, aplastándolos sobre papel toalla, dejándolos secar durante unas horas, y luego se despegaron del papel, se limpiaron y se guardaron en polistoles herméticos en heladera hasta su uso (tratamiento de semillas limpias y secas: LS).

Ensayos de germinación

Los ensayos de germinación se realizaron en cajas de Petri plásticas, utilizando como sustrato cuatro capas de papel toalla y una capa de papel de filtro humedecido con 5 ml de agua destilada, en condiciones de luz (fotoperíodo de 12 h) y oscuridad, a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$. En cada caja de Petri se sembraron 25 semillas, y se realizaron 4 repeticiones de cada combinación.

Las semillas provenientes de ambas formas de acondicionamiento y tras 14 días desde la cosecha, se sometieron a un pretratamiento de lavado, sumergiéndolas en 100 ml de agua destilada con agitación constante (1 h) seguido de un periodo de reposo (1 h). Como tratamiento control, se sembraron semillas directamente sin pretratamiento.

Adicionalmente, y al finalizar el ensayo anterior, semillas LS se sembraron en cajas de Petri con cuatro capas de papel toalla y una capa de papel de filtro humedecido con 5 ml de solución de fluridona ($40\text{ }\mu\text{M}$), y bajo las mismas condiciones de luz y oscuridad descriptas.

Cada tres días se registró la germinación, definida como la emergencia de 1 mm de la radícula. Al finalizar los ensayos (60 días), las semillas se clasificaron en muertas y firmes (potencialmente viables).

Ensayos de viabilidad

Diez semillas provenientes de distintos tiempos de almacenamiento (1 semana, 1, 2 y 3 meses) por cada acondicionamiento (RL y LS) se hidrataron por 24 h a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en placas de Petri con cuatro capas de papel toalla y una capa de papel de filtro humedecido con 5 ml de agua destilada. Posteriormente, las semillas se seccionaron longitudinalmente con bisturí bajo lupa. Ambas mitades se colocaron en tubos Eppendorf y se sumergieron en 0,5 ml de solución de trifetil tetrazolio al 0,5 %, y llevados a baño termostático a $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 1 h. Transcurrido el tiempo, se lavaron y observaron los embriones bajo lupa.

Complementariamente se realizó una prueba de tinción a las semillas no germinadas del ensayo adicional de fluridona en presencia de luz y se comparó con las no germinadas del tratamiento control.



La viabilidad se evaluó mediante la observación cualitativa de la formación de una coloración rojosa en el embrión.

3. RESULTADOS

Ensayos de germinación

El inicio de la germinación se registró alrededor de los 25 días para la mayoría de los tratamientos, excepto para RL bajo condiciones de luz que comenzaron a germinar a los 16 días (Cuadro 1). Los porcentajes de germinación no superaron el 10 % para las condiciones evaluadas, y solo se registró en presencia de luz. No se evidenció diferencia entre el tipo de acondicionamiento de la semilla (RL y LS) y el pretratamiento de lavado. Solo hubo diferencias según la condición lumínica, registrándose un 0 % de germinación en oscuridad para todos los casos. La inspección de las semillas al finalizar los ensayos indicó que todas se clasificaron como firmes.

Cuadro 1. Porcentaje de germinación alcanzado y días al comienzo de la germinación para diferentes formas de acondicionamiento de las semillas, tratamiento de control o lavado, y condición lumínica.

Acondicionamiento de las semillas	Tratamiento	Condición lumínica	Germinación (%)	Comienzo de la germ. (días)
RL	Control	Luz	3	16
		Oscuridad	0	---
	Lavados	Luz	8	24
		Oscuridad	0	---
LS	Control	Luz	7,63	26
		Oscuridad	0	---
	Lavados	Luz	5,33	26
		Oscuridad	0	---

La prueba adicional con fluridona promovió la germinación sólo en presencia de luz, alcanzando un 38,67 % y sin afectar el inicio de germinación (26 días).

Ensayo de viabilidad

Las semillas recién recolectadas (1 semana de almacenamiento) mostraron alta viabilidad (Fig.1, A y E), independientemente de la condición de acondicionamiento (RL y LS). Esto se observa en la coloración rojiza de los embriones. A lo largo del periodo de almacenamiento (1, 2 y 3 meses) la coloración del embrión se mantuvo semejante para las semillas de LS. Sin embargo, para las semillas conservadas dentro de los frutos enteros en heladera (RL) evidenciaron cambios tenues en la coloración a rosáceo claro o blancos en algunos casos (Fig. 1, F y G). Asimismo, los frutos enteros conservados en la heladera mostraron signos de putrefacción progresiva, a pesar de asegurar la aireación y la eliminación de los frutos podridos. Por lo que a los 3 meses de la cosecha se interrumpió la evaluación de viabilidad por tinciones de las semillas provenientes del fruto entero.

La prueba adicional de viabilidad con semillas no germinadas luego de dos meses en los tratamientos en luz tanto para el control como para el tratamiento con fluridona, mostraron evidencias de baja coloración en el embrión (Fig. 2 B y C) al ser comparadas con el tratamiento LS (Fig. 2 A).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El comportamiento germinativo observado concuerda con el patrón descrito para diversas solanáceas, con bajos porcentajes de germinación en ausencia de tratamientos para superar la dormición (Baskin y Baskin, 2026; Commander et al., 2008; Wei et al., 2010). En *Solanum granulosum-leprosum*, la presencia de sustancias inhibitoras en la cubierta seminal no parecería explicar este comportamiento, como fue sugerido por Ricardo (2013), ya que el tratamiento de lavado no promovió la germinación. La aplicación exógena de giberelinas promueve la germinación en diversas solanáceas (Commander et al., 2008; Franco-Ramírez et al., 2026; Wei et al., 2010), aunque este efecto aún no ha sido evaluado en *S. granulosum-leprosum*. En este trabajo, la fluridona, inhibidor de la biosíntesis de ABA, promovió la germinación, aportando evidencia sobre la participación de esta hormona en el mantenimiento de la dormición. Sin embargo, la fluridona incrementó el porcentaje final de germinación sin adelantar su

inicio, lo que podría sugerir que la reducción del ABA no sería suficiente para acelerar el proceso germinativo. En consecuencia, futuros estudios deberían evaluar el efecto de las giberelinas y otros promotores, solos o combinados con fluridona, para dilucidar el tipo de dormición en *S. granulosum-leprosum*. Dado el escaso estudio de la fluridona en Solanaceae, estos resultados aportan evidencia novedosa sobre la regulación hormonal de la germinación en la familia.

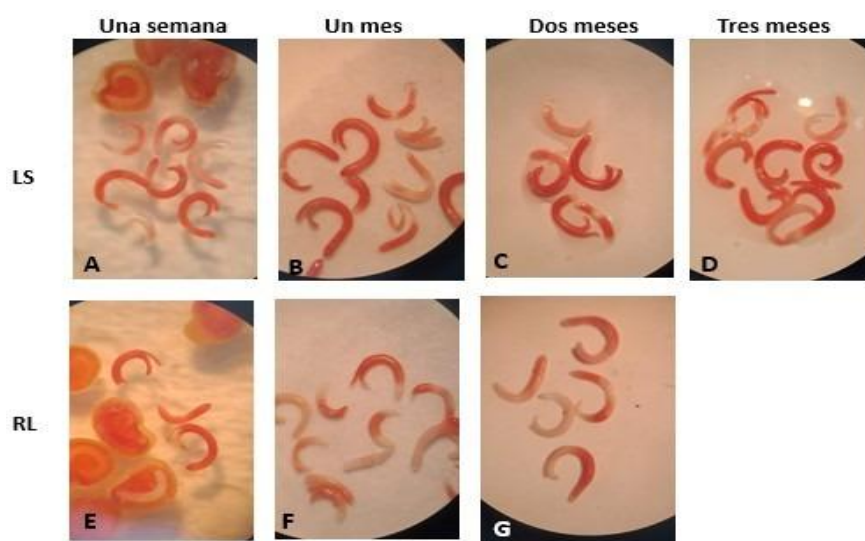


Figura 1. Embriones de *S. granulosum-leprosum* teñidos con trifenil tetrazolio provenientes de semillas con diferente acondicionamiento: semillas limpias y secas (LS) o recientemente limpias (RL), y con diferente tiempo de almacenamiento: 1 semana, un mes, dos meses, tres meses. A. LS, 1 semana. B. LS, un mes. C. LS, dos meses. D. LS, tres meses. E. RL, una semana. F. RL, un mes. G. RL, dos meses.

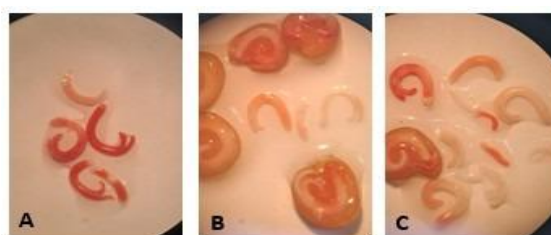


Figura 2. Embriones de *S. granulosum-leprosum* con dos meses de edad teñidos con trifenil tetrazolio provenientes de: A. Semillas limpias y secas almacenadas en heladera. B. Semillas firmes al final del ensayo de germinación a 20 °C y luz en tratamiento control. C. Semillas firmes al final del ensayo de germinación a 20 °C y luz en tratamiento con fluridona.

La elevada proporción de semillas firmes al finalizar los ensayos podría sugerir la presencia de dormición fisiológica no profunda, común en otras solanáceas (Baskin y Baskin, 2026; Commander et al., 2008). Sin embargo, la baja viabilidad detectada mediante tetrazolio indica que muchas de estas semillas se deterioraron durante la incubación (20 °C y luz). Este resultado difiere de lo informado por Carvalho (2008), quien atribuyó la permanencia de semillas viables no germinadas a la persistencia de la dormición. Asimismo, la temperatura de incubación podría no haber sido la óptima, ya que Ricardo (2013) obtuvo los mayores porcentajes de germinación de *S. granulosum-leprosum* a 25 °C. Asimismo, los datos aquí hallados coinciden con observaciones previas de nuestro grupo, en las que, luego de seis meses de almacenamiento, la germinación fue nula y la viabilidad determinada mediante tetrazolio muy baja. Estos resultados sugieren en conjunto que la viabilidad de las semillas de *S. granulosum-leprosum* depende de las condiciones a las que son sometidas, y que, bajo condiciones favorables para la germinación, aquellas que no germinan experimentan un deterioro progresivo.

Los resultados de viabilidad indican que las semillas de *S. granulosum-leprosum* permanecen viables durante al menos tres meses cuando se almacenan limpias y secas en refrigeración, condición que



conservó mejor la viabilidad y constituye la estrategia más recomendable para la conservación seminal. Este comportamiento constituye un primer indicio de la capacidad de la especie para formar bancos de semillas (Baskin y Baskin, 2026). No obstante, será necesario extender el seguimiento para determinar la duración de la viabilidad y su relación con la persistencia del banco de semillas.

5. LITERATURA CITADA

- AVES ARGENTINAS. 2025. Guía de plantas nativas de *Solanum granulosum-leprosum*. https://nativas.lanacion.com.ar/plantas/planta/Solanum_granulosum-leprosum
- BASKIN, C.C.; BASKIN, J.M. 2026. Seed dormancy and germination of Solanaceae from a phylogenetic and world vegetation perspective. Seed Science Research, 1-20. <https://doi.org/10.1017/S0960258526100142>
- BEWLEY, J.D.; BRADFORD, K.J.; HILHORST, H.W.M.; NONOGAKI, H. 2013. Seeds: Physiology of Development, Germination and Dormancy (3rd ed.). Springer.
- CABRERA, A.L. 1979. Solanaceae. En A. BURKART (eds) Flora ilustrada de Entre Río. 6(5): 346-452.
- CARVALHO, M.C.D. 2008. Frugivoria por morcegos em Floresta Estacional Semidecidual: dieta, riqueza de espécies e germinação de sementes após passagem pelo sistema digestivo. <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/5ac48df1-7276-49aa-b750-64d6ff13e010>
- COMMANDER, L.E.; MERRITT, D.J.; ROKICH, D.P.; FLEMATTI, G.R.; DIXON, K.W. 2008. Seed germination of *Solanum* spp. (Solanaceae) for use in rehabilitation and commercial industries. Australian Journal of Botany, 56(4), 333-341. <https://doi.org/10.1071/BT07209>
- FINCH-SAVAGE, W.E.; LEUBNER-METZGER, G. 2006. Seed dormancy and the control of germination. New Phytologist 171(3): 501-523. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01787>
- FLORA ARGENTINA. 2025. Descripción de *Solanum granulosum-leprosum*. <https://buscador.floraargentina.edu.ar/species/details/12764/14520>
- FRANCO-RAMIREZ, N.E.; TITO, Y.; MANRIQUE-CARPINTERO, N.C.; POMA, E.; VILLACORTA, H.S.; HAY, F. R.; ...; ANGLIN, N. L. 2026. Estimating the longevity of wild potato species through seed storage experiments. Seed Science and Technology, 54(1), 137-153. <https://doi.org/10.15258/sst.2026.54.1.12-2>
- MILIONE, G. M.; ACOSTA, M. C. 2026. Árboles nativos de Argentina: uso y adaptación en el centro-sur de la provincia de Buenos Aires. Revista Argentina Forestal. Disponible en: <https://www.argentinaforestal.com/2026/04/29/arboles-nativos-de-argentina/>
- MILIONE, G.M.; PIAZZA, G.; D'ALFONSO, C. 2021. Distribución del fumo bravo (*Solanum granulosum-leprosum* Dunal) solanaceae, en el centro de la Provincia de Buenos Aires. Artículo Breve. III Jornadas Internacionales y V Nacionales de Ambiente. Universidad Nacional de Hurlingham Argentina. https://www.researchgate.net/publication/351619452_Distribucion_del_fumo_bravo_Solanum_granulosum-leprosum_Dunal_Solanaceae_en_el_centro_de_la_provincia_de_Buenos_Aires
- PENDLETON, R.; MEYER, S.; SCHULTZ, B. 2010. Conference Proceedings: Seed Ecology III-The Third International Society for Seed Science Meeting on Seeds and the Environment-"Seeds and Change"; June 20-June 24, 2010; Salt Lake City, Utah, USA. Albuquerque, NM: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 200 p
- RICARDO, M. C. D. C. 2013. Germinação de sementes e importancia relativa da qualidade, disponibilidade e morfologia de frutos na dieta de *Carollis perspicillata* (Chiroptera: phyllostomidae). repositorio.unesp.br <https://repositorio.unesp.br/entities/publication/fc1d94cd-8a2c-45c8-9eec-8ef2a6a01fa2>
- WEI, S., ZHANG, C., CHEN, X., LI, X., SUI, B., HUANG, H., CUI, H.; LIU, Y.; Zhang, M.; GUO, F. 2010. Rapid and effective methods for breaking seed dormancy in buffalobur (*Solanum rostratum*). Weed Science 58(2): 141-146. <https://doi.org/10.1614/WS-D-09-00005.1>



DINÁMICA DEL ENOS Y LA RESPUESTA HÍDRICA EN CONCORDIA, ARGENTINA (1967–2025)

Sergio RAMOS¹, Ruben GARIN¹

RESUMEN

Este trabajo evalúa la relación entre las fases del Índice Oceánico de El Niño (ONI) y la respuesta hídrica en Concordia, Entre Ríos (1967–2025), medida a través del Índice de Precipitación Estandarizado a 3 meses (SPI-3). Mediante una prueba de chi cuadrado, se confirmó una dependencia estadísticamente significativa entre ambas variables ($\chi^2 = 40.61$; $p < 0.001$). Aunque la métrica global muestra eficiencias predictivas modestas (Valor Predictivo Positivo de 0.45 para Niña-Sequía y 0.39 para Niño-Exceso), el análisis dinámico mediante ventanas móviles de 15 años revela un drástico cambio de régimen post-2000. La asociación Niña-Sequía experimentó un salto histórico, alcanzando Odds Ratios (OR) superiores a 6, mientras que la señal Niño-Exceso mostró un acoplamiento progresivo en las últimas dos décadas. Se concluye que la eficiencia del ENOS como predictor hídrico regional es asimétrica y no estacionaria

Palabras clave: *El Niño; La Niña; calentamiento global; cambio climático*

1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad climática en el Noreste Argentino (NEA) está significativamente influenciada por el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Grimm et al., 2000). Sin embargo, la intensidad de esta teleconexión suele ser evaluada de forma estática sobre registros históricos extensos, lo que puede ocultar modulaciones multidecadales o cambios de régimen atribuidos a la dinámica oceánico-atmosférica global. El objetivo de este estudio es evaluar la dependencia categórica, la precisión diagnóstica y la evolución temporal de la eficiencia predictiva del ONI sobre la respuesta hídrica en la localidad de Concordia, Entre Ríos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

Se analizó una serie mensual continua (N = 708 observaciones) que abarca el período 1967-2025 en la localidad de Concordia, Entre Ríos. Las variables consideradas fueron:

- La señal Índice Oceánico de El Niño (ONI) (NOAA, sf): Anomalía de la temperatura de la superficie del mar en la región Niño 3.4. Se aplicó el ONI en escala mensual para clasificar las fases en Niño ($\text{ONI} \geq 0.5$), Niña ($\text{ONI} \leq -0.5$) y Neutro ($-0.5 < \text{ONI} < 0.5$).
- Respuesta Hídrica: Índice de Precipitación Estandarizado acumulado a 3 meses (SPI3), categorizado en Exceso hídrico ($\text{SPI-3} \geq 0.5$), Sequía ($\text{SPI-3} \leq -0.5$), Neutro ($-0.5 < \text{SPI3} < 0.5$). Los datos de precipitación provienen de la estación agrometeorológica de la EEA INTA Concordia.

Análisis Estadístico

1. **Global:** Se aplicó una prueba de independencia de Chi-cuadrado (χ^2) sobre la tabla de contingencia 3 x 3.
2. **Diagnóstico:** Se evaluaron parámetros de clasificación binaria (Sensibilidad, Especificidad y Valor Predictivo Positivo - VPP) para las asociaciones primarias: Niña - Sequía y Niño - Exceso hídrico.

¹ Estación Experimental Agropecuaria INTA Concordia. Ruta prov. 22 y FFCC 3200, Concordia, Entre Ríos. E-mail: ramos.sergio@inta.gob.ar



Se determinaron las probabilidades relativas (*Odds Ratio*)

3. **Análisis Dinámico por Ventana Móvil:** Para evaluar la estacionariedad, se empleó una ventana centrada de 180 meses (15 años) calculando:
 - La probabilidad condicional móvil $P(\text{Sequía} | \text{Niña})$ y $P(\text{Exceso} | \text{Niño})$ con Intervalos de Confianza al 95% (IC 95%).
 - Las probabilidades relativas *Odds Ratio* (OR) móvil con su respectivo IC 95% para cuantificar la fuerza de la asociación a lo largo del tiempo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Asociación Global: la prueba de Chi-cuadrado confirmó una asociación altamente significativa entre el estado del Pacífico y la respuesta hídrica en Concordia ($\chi^2 = 40.61$, $gl = 4$, $p < 0.001$) (Tabla 1).

Tabla 1. Tabla de Contingencia Observada (Frecuencia de Meses)

Señal ONI _m /Respuesta	Exceso hídrico	Neutro	Sequía	Total
Neutro	101	127	91	319
Niña	36	76	93	205
Niño	72	78	34	184
Total	209	281	218	708

Al evaluar la matriz de confusión, se detectó una asimetría histórica en la precisión del pronóstico: La Niña como predictor de Sequía: Sensibilidad = 0.43, Especificidad = 0.77, VPP (Precisión) = 0.45. El Niño como predictor de Exceso: Sensibilidad = 0.34, Especificidad = 0.78, VPP (Precisión) = 0.39. Globalmente, La Niña presentó un mayor Valor Predictivo Positivo (45%) que El Niño (39%), indicando que la fase fría del ONI históricamente generó una señal más certera en Concordia.

2. Evolución Temporal y Cambio de Régimen Post-2000

El análisis dinámico en ventana móvil reveló que la relación entre la señal ONI y la respuesta local no ha sido constante, mostrando un comportamiento no estacionario a lo largo del periodo analizado. Entre 1975 y 1995, las probabilidades condicionales se mantuvieron en niveles moderados (30% - 40%). A partir del año 2000, $P(\text{Sequía} | \text{Niña})$ experimentó un ascenso marcado, alcanzando un pico superior al 60% entre 2008 y 2012. La curva $P(\text{Exceso} | \text{Niño})$ mostró un comportamiento desfasado, pero convergente: desde valores cercanos al 20% a finales de los 90, ascendió sostenidamente hasta igualar a La Niña en el rango del 50% hacia el período 2012–2018 (Gráfico 1).

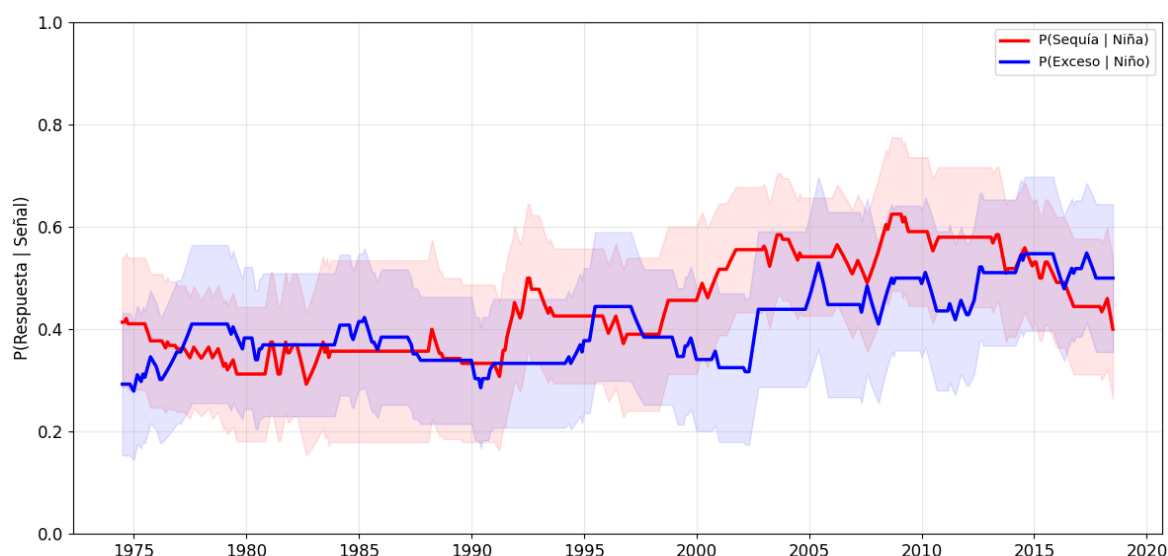


Gráfico 1. Evolución de la Eficiencia Predictiva del ONI ($P(\text{Respuesta} | \text{Señal})$) en Concordia en ventana móvil de 15 años.

El OR para la relación Niña-Sequía presentó un fuerte crecimiento con el cambio de milenio, pasando de valores cercanos a la neutralidad ($OR \sim 1.5$) a picos históricos donde $OR > 7$. El OR de Niño-Exceso mostró un incremento más gradual, alcanzando niveles por encima de $OR = 2$ y luego bajando levemente en el período reciente (Gráfico 2).

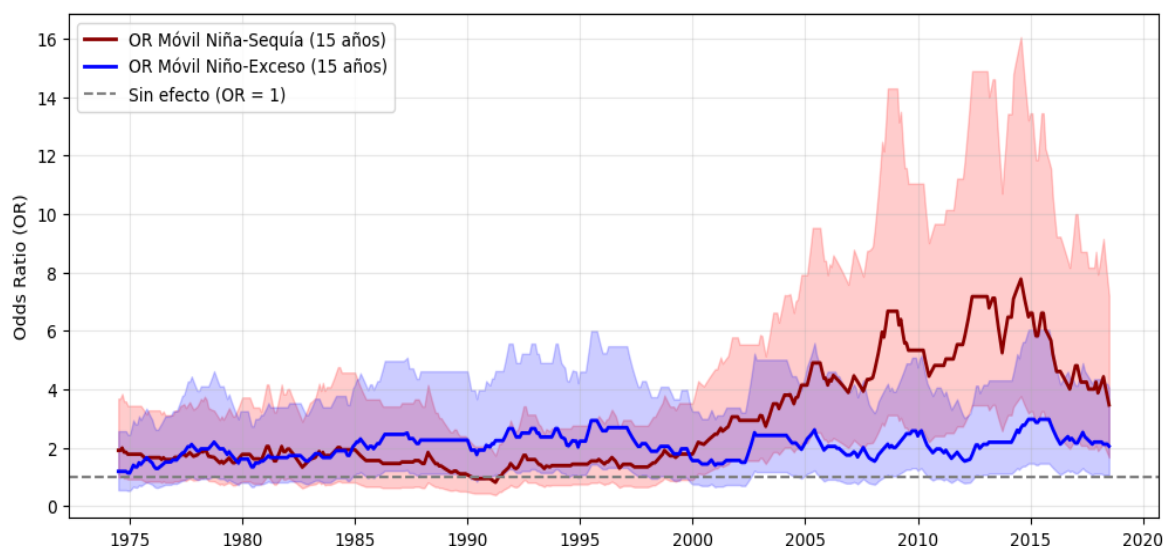


Gráfico 2. Evolución del Odds Ratio del ONI-Respuesta en Concordia en ventana móvil de 15 años

Los resultados demuestran que la teleconexión ENOS-Concordia no es un sistema estático. Aunque el análisis global de 58 años refleja que La Niña es un mejor predictor absoluto de déficits hídricos (45% de precisión frente al 39% del Niño), el análisis dinámico demuestra que esta superioridad se consolidó principalmente a partir del año 2000.

Estos resultados muestran una asimetría en la relación señal ONI $\rightarrow$ respuesta, así como la no estacionariedad. El aumento de la temperatura superficial del mar en el Atlántico Sur aporta un mayor contenido de humedad precipitable a la cuenca del Plata (Leyba, 2020). Esta mayor disponibilidad de humedad podría actuar como un "combustible local" que amplifica los forzantes traídos por El Niño. La mayor frecuencia de eventos ENOS centrados en la región Niño 3.4 (El Niño Modoki) se traduce en menores precipitaciones en la región comparado a un ENOS normal (canónico) (Cai et al., 2014), lo que explicaría la leve baja de los últimos años en la relación El Niño $\rightarrow$ Exceso hídrico. El dipolo del océano Índico (IOD) también introduce variación en la respuesta de la señal ONI a nivel global, incluida nuestra región (Andrian et al., 2024).

Aunque existe una gran linealidad en la respuesta (señales opuestas para fases opuestas), la simetría es más marcada en La Niña durante el año de inicio del evento. La Niña tiende a establecer un patrón de circulación atmosférica (anomalías de presión) más estable sobre el Atlántico y el Pacífico que favorece la supresión de lluvias de manera más predecible en el sur de Sudamérica (Grimm et al., 2000).

4. CONCLUSIONES

- Existe una dependencia estadística altamente significativa entre la señal del ONI y el SPI-3 en Concordia ($p < 0,001$).
- La Niña mantiene una mayor consistencia histórica como predictor de sequía, pero El Niño ha ganado eficiencia de acoplamiento en las últimas dos décadas.
- La fuerza de asociación (señal $\rightarrow$ respuesta) se ha intensificado notablemente desde el año 2000, lo que sugiere que la vulnerabilidad regional ante cualquier fase del ENOS es mayor en el clima actual que en el siglo pasado.



5. LITERATURA CITADA

- ANDRIAN, L.G., OSMAN, M., VERA, C.S. 2024. The role of the Indian Ocean Dipole in modulating the austral spring ENSO teleconnection to the Southern Hemisphere, *Weather Clim. Dynam.* 5: 1505–1522. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1505-2024>.
- CAI, W., BORLACE, S., LENGAINNE, M. et al. 2014. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Clim Change* 4, 111–116. <https://doi.org/10.1038/nclimate2100>.
- GRIMM, A.M., BARROS, V.R., DOYLE, M. 2000. Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *J Climate* 13: 35–58
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA) (sf). Oceanic Niño Index (ONI) (ERSSTv5) [Conjunto de datos]. Climate Prediction Center. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensoni/v5/.
- LEYBA, I.M. 2020. Estudio de la interacción océano-atmósfera en el Atlántico Sur y su rol en la precipitación en el sur de Sudamérica. (Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.). Recuperado de https://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n6769_Leyba.



INTA ForestMap: UNA HERRAMIENTA PARA EL ANÁLISIS DE RELEVAMIENTOS FOTOGRAMÉTRICOS Y LIDAR. APLICACIÓN A UN SISTEMA SILVOPASTORIL

Eduardo HILDT¹, Abel SCHERF², Martín GALARZA³

RESUMEN

La gestión de plantaciones forestales y sistemas silvopastoriles requiere del conocimiento de la estructura forestal, siendo clave la densidad, altura y cobertura de copas. Los relevamientos aéreos con drones (LiDAR y fotogrametría) tienen la capacidad de capturar datos sobre grandes superficies, pero su transformación en datos depende de la disponibilidad de software comercial o de herramientas libres que exigen habilidades de programación. En este artículo se presenta INTA ForestMap, una aplicación con interfaz gráfica, de código abierto, desarrollada en base al paquete lidR del sistema R. Esta integra el flujo completo de análisis de nubes LiDAR o fotogramétricas —clasificación del terreno, modelos digitales, detección de árboles individuales y métricas de rodal— sin requerir programación, entregando resultados listos para su incorporación a software SIG y un informe automático. Como caso de aplicación, se presenta el análisis de un sistema silvopastoril de 27,7 ha en Santiago de Liniers (Misiones, Argentina) con 6 rodales (5 de *Pinus* spp. y 1 de *Eucalyptus* sp.). Se detectaron 4.362 árboles, con densidades de 116,5 a 196,5 árb/ha y coberturas de copas de 19,7 a 58,2 % según el rodal. Esta herramienta busca facilitar la aplicación de los relevamientos aéreos para el monitoreo de sistemas productivos forestales.

Palabras clave: *teledetección forestal, drones, modelo de altura de copas, cobertura de copas, desarrollo de software.*

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la vegetación en sistemas productivos forestales —plantaciones forestales de especies exóticas o nativas, sistemas silvopastoriles, sistemas agroforestales, bosques nativos bajo manejo— requiere información estructural detallada del terreno y de la cobertura. Los relevamientos aéreos mediante sensores LiDAR (*Light Detection and Ranging*) y o mediante fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (drones) han transformado la capacidad de mapear los sistemas productivos, capturando datos de alta resolución sobre grandes superficies en tiempos reducidos. Estos relevamientos permiten tanto la obtención de imágenes para alimentar los procesos de teledetección y SIG (ortomosaicos), como también la generación de nubes de puntos tridimensionales, capaces de capturar el relieve y la estructura de la vegetación. A partir de estas nubes de puntos pueden derivarse modelos digitales del terreno, alturas de la cobertura vegetal, detección de árboles individuales y métricas estructurales clave para la planificación y el manejo.

Actualmente, el procesamiento de los datos generados en los relevamientos aéreos representa el cuello de botella en el flujo de trabajo para el estudio de sistemas forestales. A pesar de que existen numerosas plataformas de *software* para el manejo de nubes de puntos, mayoritariamente orientadas a la topografía, la construcción o la minería, estas no suelen presentar un conjunto de herramientas específicas para el análisis de información forestal. Las soluciones comerciales como Trimble Business Center (TBC), LiDAR360 (GreenValley) o LP360 ofrecen robustez, pero implican licencias de costo elevado, código cerrado y, salvo módulos forestales específicos de pago, carecen de funciones bien parametrizadas para la detección de árboles individuales, mapeo de cobertura y estimación de características dasométricas. Las soluciones de fotogrametría (OpenDroneMap, Agisoft Metashape, Pix4D) se limitan a procesar los relevamientos fotogramétricos y generar ortomosaicos y nubes de puntos. Las herramientas libres de uso

¹ INTA EEA Montecarlo, grupo Forestal. hildt.eduardo@inta.gob.ar.

² INTA EEA Montecarlo, grupo Sanidad Vegetal. scherf.abel@inta.gob.ar

³ INTA EEA Yuto, AER Tartagal. galarza.martin@inta.gob.ar



general (CloudCompare, QGIS) no automatizan el flujo forestal completo y requieren ensamblar manualmente múltiples pasos, mientras que el software forestal FUSION, opera por línea de comandos sin interfaz gráfica accesible.

Por otra parte, los avances recientes sobre mapeo de variables forestales por medio de sensores remotos no se ven reflejados inmediatamente en los *software* comerciales destinados al trabajo profesional, requiriendo que cada usuario realice su propia implementación por medio de programación. En este contexto, el paquete lidR (Roussel et al., 2020), disponible para el lenguaje de programación R, se ha consolidado como estándar de código abierto para el procesamiento de datos LiDAR aerotransportados en aplicaciones forestales (Dalla Corte, 2022).

El *software* INTA ForestMap fue desarrollado para cubrir la brecha que dificulta la aplicación de estas herramientas al análisis de relevamientos aéreos forestales. INTA ForestMap encapsula el flujo de análisis de lidR en una interfaz gráfica amigable, que no requiere de habilidades de programación. Este trabajo tiene un doble objetivo: (a) presentar la arquitectura, la funcionalidad y el potencial de transferencia tecnológica de INTA ForestMap como herramienta de código abierto; y (b) validarla mediante un caso de aplicación en un sistema silvopastoril con rodales de *Pinus* spp. y *Eucalyptus* sp.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción de la herramienta. INTA ForestMap es una aplicación interactiva desarrollada en R (≥ 4.0) sobre el ecosistema lidR ($\geq 4.2.3$; Roussel et al., 2020), con interfaz gráfica web construida con el entorno Shiny. Además, para el manejo de datos espaciales, la visualización 3D interactiva, y la generación de informes automáticos, integra herramientas de los paquetes terra, sf, plotly, rmarkdown, knitr y pagedown. Es de código abierto bajo licencia GNU GPL-3.0 y de descarga libre desde su repositorio (Hildt, 2026). La interfaz se organiza en un único panel de navegación con cinco pestañas (Configuración, Carga de datos y clasificación, Modelos digitales, Identificación de árboles, Exportación de resultados), con una lógica de asistente auto-guiado que habilita cada pestaña según el avance del análisis. Cada etapa del análisis cuenta con un conjunto de parámetros predefinidos que el usuario puede seleccionar de forma intuitiva e iterativa, permitiendo la exploración de la configuración de análisis más adecuada para cada situación. Gracias a que el paquete lidR incorpora de forma nativa la paralelización de ciertos análisis, INTA ForestMap ha sido configurado para emplear el 75 % de los hilos de procesamiento disponibles en la computadora del usuario, permitiendo un uso eficiente de los recursos de cómputo.

2.2. Flujo de procesamiento de la nube de puntos. El flujo de análisis programado en la herramienta comienza con la validación de los datos de entrada: la pestaña de Configuración permite elegir un archivo de nube de puntos (LAS o LAZ) y verifica automáticamente la coincidencia del sistema de referencia (CRS) entre la nube de puntos y el área de interés (archivo shapefile, GeoJSON o KML). Si el área de interés contiene diferentes polígonos, permite elegir con cual se desea trabajar.

En la etapa de Carga y clasificación, la nube se submuestra a una densidad de puntos por metro cuadrado adecuada para un uso de recursos eficiente. También se eliminan puntos duplicados y se filtra el ruido con el algoritmo SOR (*Statistical Outlier Removal*). La clasificación de puntos de suelo emplea el algoritmo CSF (*Cloth Simulation Filter*; Zhang et al., 2016) para modelar una malla teórica correspondiente al nivel del terreno, interpolado en aquellas áreas en las cuales la vegetación o las construcciones no permiten contar con una reconstrucción real del suelo. La sensibilidad del algoritmo CSF a los parámetros de rigidez y resolución de la malla ha sido documentada en comparaciones recientes de algoritmos de filtrado de suelo (Chen et al., 2021; Bailey et al., 2022). Para simplificar esta calibración sin sacrificar reproducibilidad, INTA ForestMap ofrece tres escenarios preconfigurados de relieve (llano, ondulado y quebrado) que fijan los parámetros de rigidez, resolución de tela y umbral de clasificación del algoritmo. La verificación de los resultados se realiza por medio de una visualización 3D interactiva.

En la etapa de Modelos digitales, el Modelo Digital de Elevación (DEM) se genera por interpolación triangular (TIN) de los puntos que fueron clasificados como “Suelo”, y se suaviza en dos etapas mediante filtros focales (primero un filtro de mínimo para mitigar errores provocados por la vegetación baja y luego de media para suavizar el microrelieve). A partir del DEM suavizado se derivan curvas de nivel con equidistancia definida por medio de un selector con tres opciones: 0,5 m, 1 m, 5 m. La normalización de la



nube de puntos (cálculo de alturas relativas al nivel del terreno) se realiza restando a la elevación de cada punto (coordenada Z) el nivel del DEM. El Modelo de Altura de Copas (CHM) se genera por medio del algoritmo p2r, aplicando interpolación por vecinos más cercanos.

En la pestaña Árboles, la detección de árboles individuales emplea el algoritmo LMF (*Local Maximum Filter*) sobre el CHM, que identifica el ápice de cada árbol mediante una ventana de búsqueda y una altura mínima configurables. Cabe aclarar que esta etapa detecta ápices puntuales, no delinea la copa de cada individuo: la cobertura de copas se obtiene de forma independiente, umbralizando el CHM (área con altura superior a un valor de corte) y vectorizando la máscara binaria resultante. Por último, la etapa de Exportación guarda las nubes clasificadas y normalizadas, los productos raster (DEM, CHM) y vectoriales (curvas de nivel, árboles identificados, cobertura de copas), y genera automáticamente un informe PDF que describe los resultados obtenidos.

2.3. Caso de aplicación. Para demostrar la funcionalidad de la herramienta se ha elegido el caso de un sistema silvopastoril ubicado en Santiago de Liniers, Misiones, Argentina, relevado mediante fotogrametría con un dron DJI Air2S. La nube de puntos empleada para el análisis cuenta con una densidad de puntos de 51,9 puntos/m². El área de interés comprende 6 rodales que totalizan 27,7 ha: cinco de *Pinus spp.* (entre 3,86 y 5,64 ha) y uno de *Eucalyptus sp.* (4,01 ha). Cada rodal se procesó de forma independiente, submuestreado a una densidad de trabajo de 25 puntos/m².

Parámetros de procesamiento aplicados en el caso. Siguiendo el flujo descrito anteriormente, la clasificación de suelo utilizó el perfil "ondulado" en los cinco rodales de *Pinus* y el perfil "quebrado" en el rodal de *Eucalyptus*, de relieve más irregular. El DEM se generó a 0,5 m de resolución y el CHM a 1 m. La detección de árboles empleó una ventana de búsqueda de 4 m en todos los rodales, con altura mínima de 10 m para excluir falsas detecciones y arbustos nativos, y la cobertura de copas se calculó con un umbral de 4,0 m en todos los casos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Funcionalidad entregada por INTA ForestMap. La herramienta desarrollada ofrece un conjunto de funcionalidades que complementan el procesamiento algorítmico básico necesario para extraer información forestal de las nubes de puntos LiDAR o fotogramétricas. La interfaz está disponible en español, inglés y portugués, facilitando el empleo de la aplicación en redes de trabajo internacionales. Un visor 3D interactivo permite explorar la nube de puntos clasificada (suelo y vegetación diferenciados por color). Cada bloque de parámetros del flujo (submuestreo, clasificación de suelo, resolución de modelos, detección de árboles) se presenta como un conjunto de selectores predefinidos, con opciones adicionales personalizables, con indicación explícita cuando el usuario se aparta de la configuración recomendada, reduciendo la necesidad de conocimiento técnico previo sin eliminar la posibilidad restringir el ajuste detallado. El informe PDF generado al final del análisis incluye, además de las figuras y métricas de cada etapa, indicadores de gestión forestal calculados automáticamente: espaciamiento medio entre árboles, coeficiente de variación de alturas con una clasificación cualitativa de homogeneidad del rodal. Estos productos reducen la brecha entre la disponibilidad de datos de relevamientos con dron y su uso efectivo en la toma de decisiones de manejo.

3.2. Comparación con alternativas existentes. Frente a las alternativas comerciales de uso general, INTA ForestMap permite realizar el flujo de análisis forestal completo sin costos de licenciamiento y de manera reproducible. A su vez, consigue eliminar la barrera de programación que limita la aplicación práctica de las herramientas del paquete lidR fuera del entorno académico.

De manera análoga, al aplicar la clasificación del terreno mediante CSF incorporando tres escenarios preconfigurados de relieve ya probados para las situaciones típicas observadas en rodales forestales, se transfiere ese conocimiento técnico a la propia herramienta. La posibilidad de realizar el procesamiento de varios rodales de un mismo relevamiento, con parámetros ajustables según relieve y desarrollo, refuerza además su eficiencia operativa frente al ensamblado manual de *scripts* que exigen las herramientas libres de uso general.

3.3. Potencial y limitaciones. El caso de estudio demuestra la capacidad de ForestMap para procesar por lotes rodales de distinta especie, edad y relieve capturados en un mismo relevamiento. Esta capacidad es



relevante para sistemas silvopastoriles y agroforestales, donde estudios recientes han empleado UAV con distintos sensores para estimar biomasa y estructura del componente arbóreo: en teca (*Tectona grandis*) en sistemas silvopastoriles de Costa Rica (Hernández-Cole et al., 2021) y en plantaciones de *Eucalyptus* con distintas densidades de nube LiDAR (Cunha Neto et al., 2025; Enriquez Pinedo et al., 2025). En ese contexto, una herramienta de código abierto que integre el flujo completo sin requerir programación reduce una barrera de adopción documentada en trabajos sobre infraestructura de datos geospaciales abiertos para investigación aplicada, como el conjunto de *hardware* y *software* libre desarrollado para captura aérea de datos por Pereyra Irujo et al. (2023).

3.4. Caso de aplicación: El procesamiento por lotes de los 6 rodales de la propiedad relevada (Cuadro 1) permitió caracterizar en conjunto 27,7 ha y 4.362 árboles, con una amplia variación estructural entre rodales: densidades de 116,5 a 196,5 árb/ha, alturas medias de 14,5 a 22,0 m y coberturas de copas de 19,7 a 58,2 %. Los rodales de menor altura media y mayor densidad corresponden a plantaciones más jóvenes. Los rodales con menores densidades corresponden a sistemas silvopastoriles que ya han sido intervenidos con múltiples raleos para compatibilizar la producción ganadera con el componente forestal. El rodal Pino_4 es una situación anómala: su elevado coeficiente de variación en la altura (21,6 %) y su altura máxima (41,9 m) se explican por la presencia de un bloque de *Eucalyptus* sp. dentro del polígono, cuyos individuos superan en altura a los demás pinos del rodal, lo que evidencia la capacidad de la herramienta para detectar la heterogeneidad dentro de un lote. El rodal Euca_1 (puro) se distingue por su baja cobertura de copas (19,7 %) frente a los rodales de *Pinus* (44,2–58,2 %). Esto se debe a que los eucaliptos han sido plantados en líneas dobles separados por callejones anchos que dejan gran parte de la superficie sin cobertura forestal.

Cuadro 1. Comparación estructural de los 6 rodales analizados en el establecimiento (Santiago de Liniers, Misiones).

Rodal	Especie	Sup. (ha)	Árb. det.	Dens. (árb/ha)	Alt. media (m)	Alt. máx (m)	CV alt. (%)	Cob. copas (%)
Pino_1	<i>Pinus</i> sp.	5,64	1.108	196,5	14,5	23,1	15,8	48,1
Pino_2	<i>Pinus</i> sp.	4,65	643	138,3	19,9	25,4	10,8	50,5
Pino_3	<i>Pinus</i> sp.	5,00	918	183,6	14,8	26,8	15,6	44,2
Pino_4	<i>Pinus</i> sp. + <i>Eucalyptus</i> sp. ¹	4,52	630	139,4	22,0	41,9	21,6	52,0
Pino_5	<i>Pinus</i> sp.	3,86	596	154,4	21,3	29,2	16,8	58,2
Euca_1	<i>Eucalyptus</i> sp.	4,01	467	116,5	16,6	20,3	10,7	19,7

¹ Rodal mixto: incluye un bloque de *Eucalyptus* sp. dentro del polígono, lo que explica la altura máxima y el coeficiente de variación elevados respecto de los demás rodales de *Pinus*.

Estos valores son coherentes con el rango reportado para plantaciones de *Eucalyptus* bajo manejo agroforestal, donde alturas medias y densidades de nube similares producen estimaciones de altura con errores relativos moderados (Cunha Neto et al., 2025; Enriquez Pinedo et al., 2025), y refuerzan el rol de los UAV como herramienta consolidada para caracterizar la estructura de sistemas silvopastoriles (Hernández-Cole et al., 2021). En la Figura 1, se observan ejemplos de salidas gráficas obtenidas con el INTA ForestMap del caso de prueba rodal Pino_5.

4. CONCLUSIONES

INTA ForestMap constituye un aporte científico-tecnológico de código abierto que pone a disposición de los usuarios finales (técnicos y profesionales) el flujo completo de análisis de nubes de puntos LiDAR y fotogramétricas —clasificación de terreno, modelos digitales, detección de árboles y cálculo de métricas de rodal— en una interfaz accesible sin programación, con soporte multi-idioma, procesamiento por lotes y generación automática de informes. El caso de aplicación en un sistema silvopastoril conformado por 6 rodales de *Pinus* spp. y *Eucalyptus* sp. demuestra la funcionalidad de la herramienta, permitiendo caracterizar densidad, alturas y cobertura de copas por rodal, incluso detectando heterogeneidad de alturas dentro de un mismo polígono. La posibilidad de ajustar parámetros de procesamiento según relieve y edad, junto con la reproducibilidad del flujo de trabajo, constituyen un aporte de transferencia tecnológica de acceso libre, aplicable a otros sistemas productivos forestales y agropecuarios. Las líneas de desarrollo futuro por medio de la incorporación de algoritmos alternativos publicados permitirán ampliar aún más su potencial como herramienta de investigación y extensión.

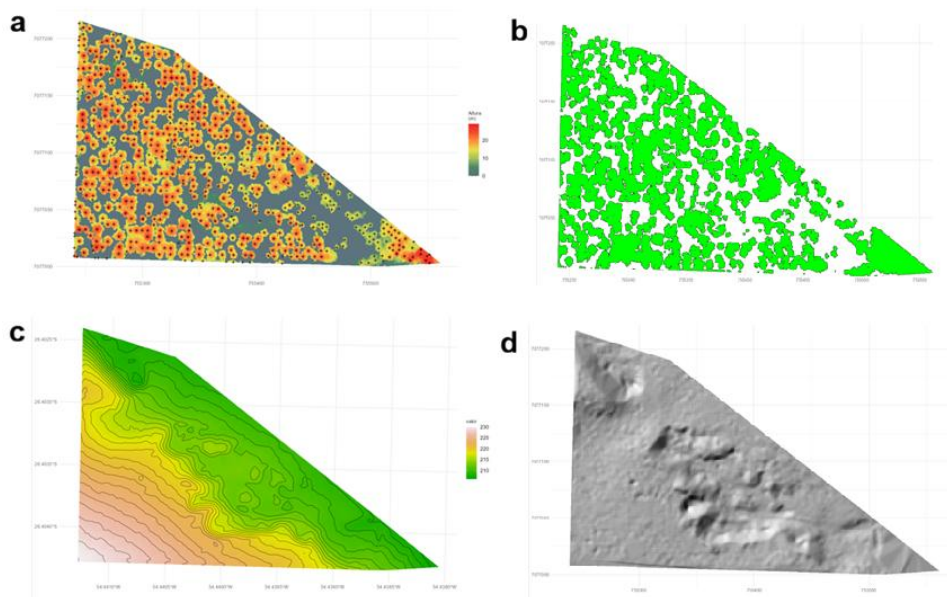


Figura 1. Salidas gráficas del INTA ForestMap para el caso de estudio Rodal Pino_5. a: Modelo de altura de copas (CHM) + Árboles detectados. b: Cobertura de copas. c: Modelo digital de elevación (DEM) con curvas de nivel. d: Sombreado del relieve (Hillshade).

5. LITERATURA CITADA

- BAILEY, G.; LI, Y.; MCKINNEY, N.; YODER, D.; WRIGHT, W.; HERRERO, H. 2022. Comparison of ground point filtering algorithms for high-density point clouds collected by terrestrial LiDAR. *Remote Sensing* 14(19):4776. <https://doi.org/10.3390/rs14194776>.
- CHEN, C.; GUO, J.; WU, H.; LI, Y.; SHI, B. 2021. Performance comparison of filtering algorithms for high-density airborne LiDAR point clouds over complex landscapes. *Remote Sensing* 13(14):2663. <https://doi.org/10.3390/rs13142663>.
- CUNHA NETO, E.M.; GUARANÁ, E.; MOURA, M.M.; VERAS, H.F.P.; ZAMBRANO, A.M.A.; BROADBENT, E.N.; MAIA, E.; PELISSARI, A.L.; LANSSANOVA, L.R.; SANQUETTA, C.R.; DALLA CORTE, A.P. 2025. Optimizing UAV-LiDAR point density for Eucalyptus height estimation in agroforestry. *Forests* 16(11):1747. <https://doi.org/10.3390/f16111747>.
- DALLA CORTE, A.P.; BROADBENT, E.N.; SANTOS, L.H.O.; KARASINSKI, M.A.; SANQUETTA, C.R.; PRATA, G.; ALMEIDA, D.R.A.; SILVA, C.A. 2022. Aplicações do LiDAR para o inventário florestal – Enfoque unidade de área. Atena Editora. DOI: 10.22533/AT.ED.223222904
- ENRIQUEZ PINEDO, L.; ORTEGA QUISPE, K.; CCOPI TRUCIOS, D.; URQUIZO BARRERA, J.; RIOS CHAVARRÍA, C.; PIZARRO CARCAUSTO, S.; MATOS CALDERON, D.; PATRICIO ROSALES, S.; RODRÍGUEZ CERRÓN, M.; ORE AQUINO, Z.; PAZ MONGE, M.; CASTAÑEDA TINCO, I. 2025. Estimation of height and aerial biomass in Eucalyptus globulus plantations using UAV-LiDAR. *Trees, Forests and People* 19:100763. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100763>.
- HERNÁNDEZ-COLE, J.; ORTIZ-MALAVASSI, E.; MOYA, R.; MURILLO, O. 2021. Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) as a tool to predict biomass and carbon of Tectona grandis in silvopastoral systems (SPS) in Costa Rica. *Drones* 5(2):47. <https://doi.org/10.3390/drones5020047>.
- HILDT, E. 2026. INTA ForestMap: plataforma de análisis geoespacial forestal. Repositorio de código. <https://github.com/eduardohildt/ForestMAP>. Verificado el 30/06/2026.
- PEREYRA IRUJO, G.; BERNALDO, P.; VELÁZQUEZ, L.; PÉREZ, A.; MOLINA FAVERO, C.; EGOZCUE, A. 2023. Open Science Drone Toolkit: open source hardware and software for aerial data capture. *PLoS ONE* 18(4):e0284184. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0284184>.
- ROUSSEL, J-R.; AUTY, D.; COOPS, N.C.; TOMPALSKI, P.; GOODBODY, T.R.H.; MEADOR, A.S.; BOURDON, J-F.; DE BOISSIEU, F.; ACHIM, A. 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) Data. *Remote Sensing of Environment* 251:112061. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>.
- ZHANG, W.; QI, J.; WAN, P.; WANG, H.; XIE, D.; WANG, X.; YAN, G. 2016. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation. *Remote Sensing* 8(6):501. <https://doi.org/10.3390/rs8060501>.



DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE MATERIA PRIMA: HERRAMIENTA GEOESPACIAL PARA LA CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS DEL RECURSO FORESTAL EN LA ARGENTINA

Matías GAUTE¹, Mario FLORES PALENZONA²

RESUMEN

La disponibilidad de información espacialmente explícita sobre los recursos forestales es fundamental para caracterizar su distribución territorial y apoyar procesos de planificación y gestión. En este contexto, la herramienta web Distribución Espacial de Materia Prima, desarrollada sobre Google Earth Engine, permite visualizar y consultar información sobre plantaciones de *Pinus* y *Eucalyptus* en la Mesopotamia Argentina. La aplicación integra información sobre distribución espacial, especie y estratos etarios, junto con herramientas interactivas de consulta, generación de reportes y representación gráfica mediante histogramas. Asimismo, incorpora información derivada de productos satelitales y datos LiDAR espacial de la misión GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation), utilizada para estimar variables estructurales como la altura del dosel y aproximaciones al volumen con corteza. El objetivo de este trabajo es describir las principales funcionalidades de consulta y visualización de la aplicación y evaluar su utilidad para la caracterización y análisis del recurso forestal. La plataforma permite combinar la interpretación visual del territorio con consultas cuantitativas sobre superficie, especie y edad, facilitando el análisis exploratorio y la identificación de áreas de interés.

Palabras clave: *recursos forestales; distribución espacial; Google Earth Engine; teledetección; GEDI; plantaciones forestales; Pinus; Eucalyptus.*

1. INTRODUCCIÓN

La caracterización espacial de los recursos forestales es fundamental para comprender la estructura y distribución de las plantaciones y apoyar procesos de planificación, monitoreo y toma de decisiones. En la Mesopotamia Argentina, las plantaciones de *Pinus* y *Eucalyptus* constituyen un componente relevante de la actividad forestal, por lo que disponer de información espacialmente detallada permite conocer no solo dónde se encuentran, sino también cómo se distribuyen según especies, edades y características estructurales.

La incorporación de tecnologías de teledetección, sistemas de información geográfica y plataformas de procesamiento geoespacial en la nube ha ampliado las posibilidades de análisis. Google Earth Engine permite integrar grandes volúmenes de información espacial y desarrollar aplicaciones interactivas orientadas a la consulta y visualización de datos.

La herramienta Distribución Espacial de Materia Prima permite visualizar en un mapa la distribución de plantaciones forestales de *Pinus* y *Eucalyptus*, diferenciadas por estratos etarios. El usuario puede seleccionar especies y categorías de edad, realizar consultas sobre áreas de interés y obtener información cuantitativa sobre superficie, composición y variables estructurales. El objetivo de este trabajo es describir estas funcionalidades y evaluar su utilidad para la caracterización y análisis del recurso forestal.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y plataforma

El ámbito de análisis comprende la Mesopotamia Argentina, integrada por Misiones, Corrientes y Entre

¹ Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial – SAGyP-MEC. mgaute@magyp.gobar

² Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial– SAGyP-MEC. mflorespalenzona@magyp.gob.ar



Ríos, región que concentra una proporción importante de las plantaciones forestales del país. La herramienta permite analizar principalmente plantaciones de los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*, organizadas espacialmente según especie y estrato etario.

La aplicación fue desarrollada utilizando Google Earth Engine, plataforma que permite integrar y procesar información geoespacial y satelital. Su interfaz interactiva posibilita explorar el territorio mediante un mapa y aplicar filtros o selecciones para visualizar categorías específicas, transformando la consulta cartográfica en una herramienta dinámica de análisis.

Acceso a la APP: <https://www.magyp.gob.ar/desarrollo-foresto-industrial/distribucion-pino.php>

Nota periodística: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/el-gobierno-nacional-presenta-una-nueva-herramienta-de-precision-para-la-planificacion-de>

Funcionalidades de visualización y consulta

La funcionalidad principal consiste en representar cartográficamente la distribución de las plantaciones. El usuario puede seleccionar una especie de interés y determinados estratos etarios para visualizar su distribución espacial. Esta posibilidad facilita el análisis de patrones territoriales, la identificación de concentraciones de plantaciones y la comparación entre categorías.

La aplicación también permite realizar consultas espaciales sobre un área seleccionada. A partir de la zona de interés, se obtiene información sobre la superficie forestada en hectáreas, discriminada por especie y estrato etario. Los resultados pueden presentarse mediante reportes y gráficos, incluyendo histogramas, que permiten comparar cuantitativamente las categorías presentes.

La herramienta incorpora además información derivada de sensores remotos, particularmente datos LIDAR satelitales de la misión GEDI. Estos datos permiten estimar la altura del dosel o canopeo y aportar información sobre la estructura vertical de las plantaciones. A partir de esta información y otros atributos espaciales se realizan aproximaciones al volumen con corteza, expresado en metros cúbicos. Las estimaciones deben interpretarse considerando las características de los modelos utilizados y, cuando corresponda, complementarse con inventarios y mediciones de campo.

3. RESULTADOS

Visualización espacial y análisis por especie y edad

La representación cartográfica constituye uno de los principales aportes de la aplicación, ya que permite una lectura rápida de la localización y distribución del recurso forestal. La posibilidad de diferenciar las plantaciones por especie y estrato etario mejora la interpretación del territorio y permite focalizar el análisis en categorías específicas (Gráfico 1, 2).

La selección de estratos etarios resulta especialmente relevante porque la edad está asociada con diferentes etapas del ciclo de desarrollo de las plantaciones. La identificación espacial de plantaciones jóvenes, intermedias o maduras permite analizar la estructura etaria del recurso y reconocer patrones que no serían evidentes mediante una base de datos exclusivamente tabular.

Consultas espaciales, reportes e histogramas

La consulta espacial aporta una dimensión cuantitativa complementaria a la visualización. Al seleccionar un área de interés, el usuario puede conocer la superficie ocupada por las plantaciones y analizar su composición según especie y estrato etario. De este modo, el mapa permite responder principalmente dónde se encuentra el recurso, mientras que los reportes y gráficos permiten determinar cuánto recurso existe y cómo está compuesto.

Los histogramas facilitan la comparación visual de las superficies correspondientes a diferentes especies o edades y contribuyen a identificar las categorías predominantes. La interacción entre mapa, filtros y resultados gráficos favorece un proceso de análisis exploratorio en el que la información espacial y cuantitativa se interpreta de manera integrada.

Esta flexibilidad permite construir consultas adaptadas a diferentes preguntas de análisis, por ejemplo,



observar la distribución de *Eucalyptus* en determinados estratos etarios o analizar la presencia de *Pinus* en una categoría específica. La posibilidad de realizar estas operaciones sin procesar manualmente grandes bases de datos geoespaciales constituye una ventaja para estudios regionales y exploratorios.

Altura de canopeo y volumen

La incorporación de información derivada de GEDI amplía el alcance de la herramienta al incorporar variables relacionadas con la estructura vertical de las plantaciones. La altura del canopeo complementa la información de superficie, especie y edad y permite avanzar hacia una caracterización más completa del recurso.

La estimación de volumen con corteza permite analizar un área seleccionada considerando simultáneamente su superficie forestada, composición por especies, estructura etaria, altura estimada y volumen. Esta integración representa un avance respecto de los sistemas basados únicamente en información superficial. Sin embargo, los valores derivados de sensores remotos deben considerarse estimaciones, cuyo nivel de precisión depende de los datos de entrada, resolución espacial y modelos empleados.

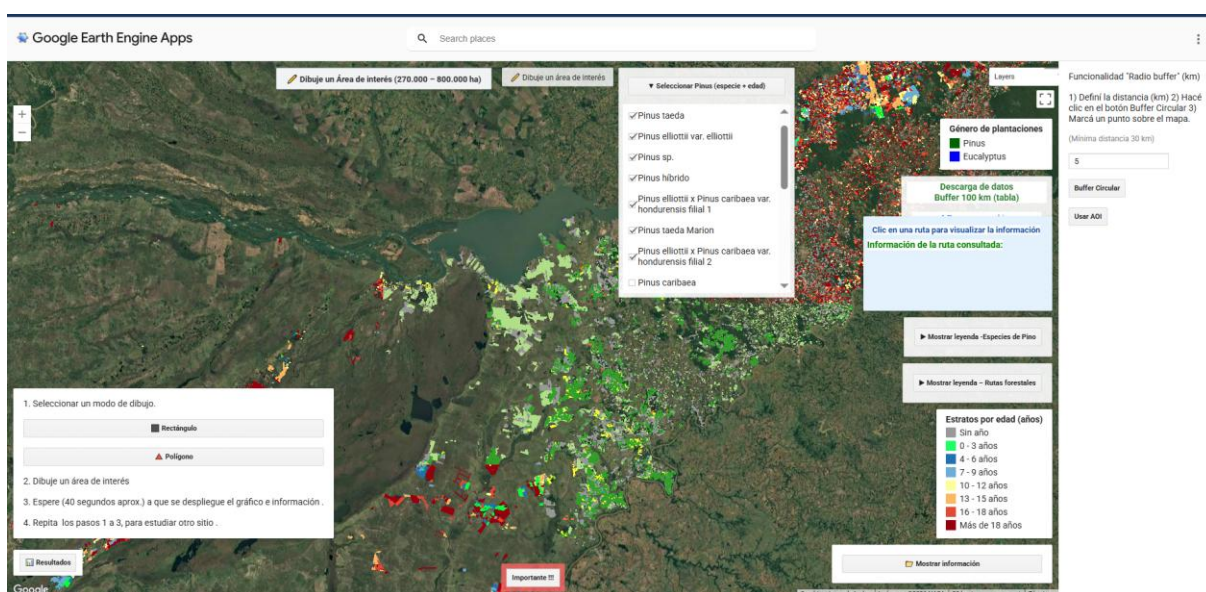


Gráfico 1. Interfaz gráfica de la plataforma.

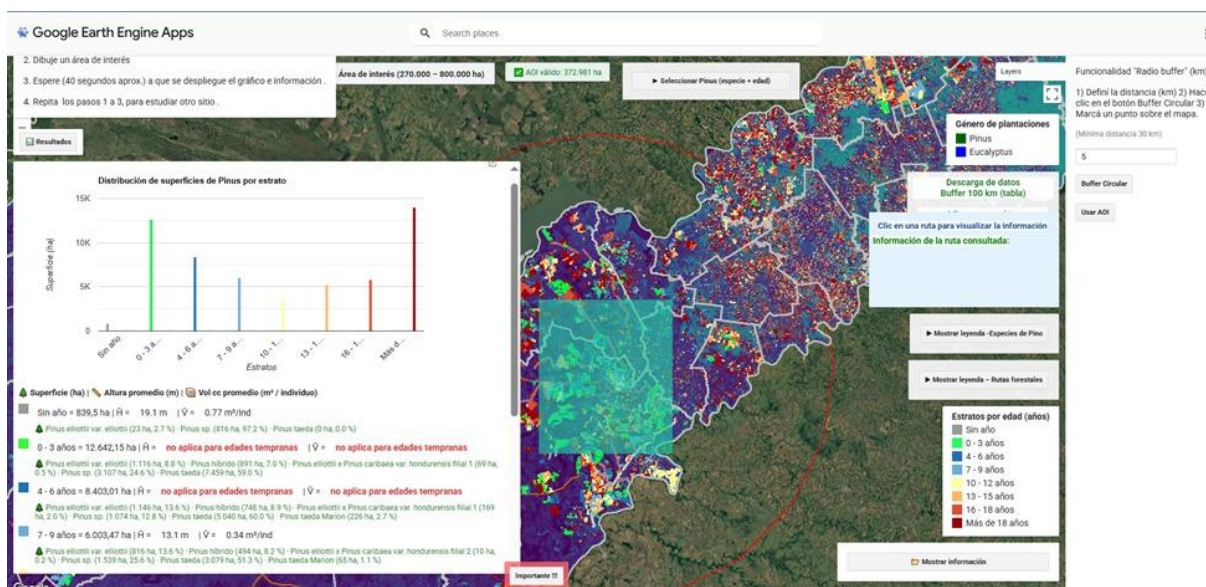


Gráfico 2. Reportes y funcionalidades para las consultas espaciales dentro de la plataforma.



4. CONCLUSIONES

La herramienta Distribución Espacial de Materia Prima constituye una aplicación geoespacial orientada a mejorar el acceso y la interpretación de información sobre plantaciones de *Pinus* y *Eucalyptus* en la Mesopotamia Argentina. Su principal aporte es integrar visualización cartográfica, consulta espacial y análisis cuantitativo dentro de una misma plataforma interactiva.

Desde el punto de vista de la caracterización forestal, la visualización de las plantaciones según especie y estrato etario permite reconocer patrones espaciales y analizar la estructura territorial del recurso. Las consultas espaciales complementan esta lectura mediante estimaciones de superficie en hectáreas y su distribución por especie y edad, mientras que los reportes e histogramas facilitan la comparación e interpretación de los resultados.

La integración de datos LiDAR satelitales de GEDI para estimar altura de canopy y aproximaciones de volumen con corteza amplía el análisis desde una descripción de la distribución superficial hacia una caracterización estructural del recurso. Esta capacidad resulta especialmente útil para estudios regionales y exploratorios, siempre considerando la necesidad de validar las estimaciones con información de campo cuando se requiera mayor precisión.

En síntesis, la principal fortaleza de la aplicación reside en combinar la interpretación visual del territorio con consultas cuantitativas dinámicas. Esta integración facilita una comprensión multidimensional del recurso forestal y constituye un aporte relevante para investigadores, técnicos y organismos vinculados con el análisis y la gestión de las plantaciones forestales argentinas.

5. LITERATURA CITADA

DIRECCIÓN NACIONAL DE DESARROLLO FORESTO INDUSTRIAL. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. Ministerio de Economía. Distribución Espacial de Materia Prima. Desarrollo Foresto-Industrial. <https://www.magyp.gob.ar/desarrollo-foresto-industrial/distribucion-pino.php>

GOOGLE EARTH ENGINE. (s. f.). Google Earth Engine: A planetary-scale platform for Earth science data & analysis. Google. <https://earthengine.google.com/>



ANÁLISIS Y DELIMITACIÓN ESPACIAL DE HUMEDALES PRIORITARIOS EN UNIDADES DE GESTIÓN FORESTAL: FUNCIÓN HIDROLÓGICA, BIODIVERSIDAD Y CONECTIVIDAD DE PAISAJE

Andrés Ángel Leonardo LINDAO¹, Gustavo Ariel MASLOWSKI¹, Rubén Carlos CINAUSKI^{1,2},
Lilian Patricia AYALA²

RESUMEN

Los humedales inmersos en paisajes productivos cumplen funciones esenciales para la regulación hidrológica, la conservación de la biodiversidad y la conectividad ecológica. El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar lineamientos de conservación y zonas de amortiguamiento para el Humedal San Juan, ubicado en una Unidad de Gestión Forestal de PINDÓ S.A. (Misiones – Argentina), mediante la integración del análisis hidrogeomorfológico de la cuenca y la caracterización ecológica del sitio. La delimitación de la cuenca y microcuenca de aporte se realizó utilizando herramientas SIG, modelos digitales de elevación y algoritmos hidrológicos. Paralelamente, la delimitación del humedal se efectuó mediante el análisis multitemporal de imágenes Sentinel-2, empleando los índices NDVI y NDWI y su validación con observaciones de campo. Los resultados permitieron identificar la unidad hidrológica que controla el funcionamiento del humedal, delimitar su área de influencia y establecer una zona buffer para orientar futuros manejos. La integración de la información espacial con los antecedentes florísticos evidenció la elevada importancia ecológica del área y su función como elemento de conectividad dentro del Bosque Atlántico del Alto Paraná. La metodología propuesta constituye una herramienta objetiva para incorporar criterios hidrológicos y de conservación en la planificación de unidades de gestión.

Palabras clave: *Sistemas de Información Geográfica, Cuencas hidrográficas, Microcuencas, Conservación biológica.*

1. INTRODUCCIÓN

Los humedales son vitales para la supervivencia humana, siendo uno de los entornos más productivos del mundo, ofreciendo diversidad biológica, fuentes de agua y productividad primaria de las que abundantes especies vegetales y animales dependen para subsistir (Moreno-Mateos et al., 2012). Ofrecen innumerables servicios ecosistémicos la humanidad y al ambiente en general, desde suministro de agua dulce, alimentos y refugio para la fauna, hasta control de crecidas, recarga de aguas subterráneas y mitigación del cambio climático (Constanza et al., 2014). En Argentina la Ley 23.919 establece la importancia de los humedales, por su valor ecológico, social y ambiental. Desafortunadamente, las evidencias demuestran que la superficie y la calidad de los humedales están disminuyendo en la mayoría de las regiones del mundo, y, por lo tanto, los servicios de los ecosistemas proporcionados se encuentran en peligro (Convención sobre los Humedales, 2025).

Por otra parte, la fragmentación de los ambientes naturales debido a la intensificación de las actividades humanas es una de las mayores amenazas para la biodiversidad, ya que los ambientes naturales están cada vez más restringidos a parches más pequeños y aislados rodeados por una matriz de usos humanos de la tierra (Haddad et al., 2015). En este sentido, la Mata Atlántica argentina aún conserva fragmentos de bosque que actúan como fuentes de población para muchas especies de mamíferos, que deben ser considerados como prioritarios en pos de favorecer la conectividad y la conservación en un paisaje de producción sostenible (Iezzi et al., 2022).

¹ Facultad de Ciencias Forestales – UNaM, Bertoni 124, Eldorado, Misiones, Argentina. Autor de correspondencia: 3751 – 525378; andres.lindao@fch.unam.edu.ar

² Pindó SA. Juan Domingo Perón 303, Puerto Esperanza, Misiones, Argentina.



El humedal situado en el Campo San Juan presenta una ubicación particular, con una superficie aproximada de 12,5 hectáreas, conectando masas boscosas aisladas con la Reserva Aguaraí-mi (creada por Decreto N° 1531/1998). Además, contribuye desde la microcuenca que lo contiene, al arroyo San Juan ubicado al Sureste. El humedal San Juan, es un área que presenta una diversidad biológica elevada, albergando especies vegetales de alto valor de conservación y consideradas en riesgo por la CITES (Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora). Se identificaron cerca de 500 especies de plantas vasculares, como así también, se ha registrado la presencia de heces y huellas de mamíferos (Informes internos PINDO, 2019-2021).

El objetivo del presente trabajo es diseñar lineamientos de conservación y zonas de amortiguamiento para el Humedal San Juan, integrando el análisis hidrogeomorfológico de su cuenca con la caracterización de su biodiversidad vegetal, para mitigar los impactos de las actividades productivas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en el “Humedal San Juan” localizado dentro de una Unidad de Gestión Forestal perteneciente a PINDO S.A., en el municipio de Puerto Esperanza, provincia de Misiones. El sitio forma parte de un paisaje forestal productivo inserto en el Bosque Atlántico del Alto Paraná, donde los humedales constituyen elementos clave para la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y la conectividad ecológica.

Delimitación de la cuenca y microcuenca de aporte

Para caracterizar el contexto hidrológico del humedal, se delimitó la cuenca y microcuenca de aporte aplicando la metodología propuesta por Lindao y Sodré Mendes Barros (2023) mediante herramientas de SIG y Teledetección. El proceso se basó en el Modelo Digital de Elevación (MDE) del Instituto Geográfico Nacional (IGN), con resolución de 30 metros, el cual fue re proyectado al sistema POSGAR 2007 / Argentina 7 para trabajar con unidades métricas. Utilizando los softwares QGIS y SAGA GIS, se unificaron las imágenes y se aplicó el algoritmo Fill Sinks para remover falsas depresiones, asegurando la continuidad de la red hídrica. Posteriormente, se determinó la jerarquización de los cursos hídricos mediante el algoritmo Strahler Order y se realizó una validación e interpretación visual con imágenes satelitales usando el complemento QuickMapService para descartar drenajes erróneos antes de la delimitación definitiva con el algoritmo Channel Network and Drainage Basins. A partir de la red validada y la delimitación del área de contribución superficial, se caracterizó morfométricamente el entorno del humedal.

Delimitación del humedal y análisis de zonas buffer

La delimitación espacial perimetral del humedal se realizó mediante un enfoque metodológico mixto que integró datos de teledetección multitemporal y validación de campo. Para ello, se procesaron imágenes satelitales Sentinel-2, que permitieron caracterizar el área de cuerpos hídricos y la vegetación asociada a estos. Con el propósito de evaluar la dinámica espacio-temporal del humedal se ejecutó un análisis multitemporal entre los años 2017 y 2022, seleccionando escenas satelitales correspondientes a ventanas fenológicas y años hidrológicos representativos. El procesamiento digital de las imágenes abarcó la aplicación de algoritmos de álgebra de bandas para el cálculo de índices espectrales radiométricos normalizados, orientados a discriminar el estado de la cobertura vegetal circundante y el comportamiento del agua superficial:

 ndice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): Aplicado para cuantificar la densidad, vigor fotosintético y biomasa de la vegetación protectora adyacente.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} = \frac{Banda\ 8 - Banda\ 4}{Banda\ 8 + Banda\ 4} \quad (1)$$

 ndice Normalizado de Diferencia de Agua (NDWI): Implementado con el fin de mapear la extensión del espejo de agua libre y delimitar zonas con altos gradientes de humedad edáfica superficial o saturación hídrica en el suelo.

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} = \frac{Banda 3 - Banda 8}{Banda 3 + Banda 8} \quad (2)$$

Una vez establecida la línea de base del humedal, se modelaron áreas de influencia y amortiguación mediante herramientas de geoprocésamiento (buffer), estructuradas en franjas concéntricas de 30, 50 y 100 metros de radio a partir del perímetro externo del humedal.

Evaluación ecológica y biodiversidad asociada

Con el objetivo de caracterizar la composición florística y la diversidad vegetal asociada al humedal, se contrató un equipo de profesionales especializados (Informes Técnicos Internos), que desarrolló el relevamiento tomando como referencia la delimitación cartográfica previamente establecida. Para ello, se implementó un diseño de muestreo estratificado basado en la identificación de cuatro unidades ambientales: selva marginal anegada, selva primaria, sotobosque de áreas forestadas y pastizal anegado. En cada uno de estos estratos se realizaron censos exhaustivos de plantas vasculares, con el propósito de determinar la riqueza específica y la composición taxonómica de la vegetación. Asimismo, se evaluó el estado de conservación de los taxones registrados mediante las categorías de la Lista Roja de la UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) y los apéndices de CITES, con el fin de identificar especies consideradas de Alto Valor de Conservación.

3. RESULTADOS

La delimitación de la cuenca y microcuenca de aporte permitió identificar la unidad hidrológica funcional que controla la dinámica del Humedal San Juan (Figura 1). El análisis evidenció que el mismo constituye el sector receptor de los escurrimientos superficiales provenientes de una microcuenca integrada a una cuenca de mayor extensión que drena hacia el arroyo San Juan. Esta configuración demuestra que el funcionamiento hidrológico del humedal depende no solo de su superficie inundada, sino también de las condiciones ambientales presentes en toda su área de aporte.

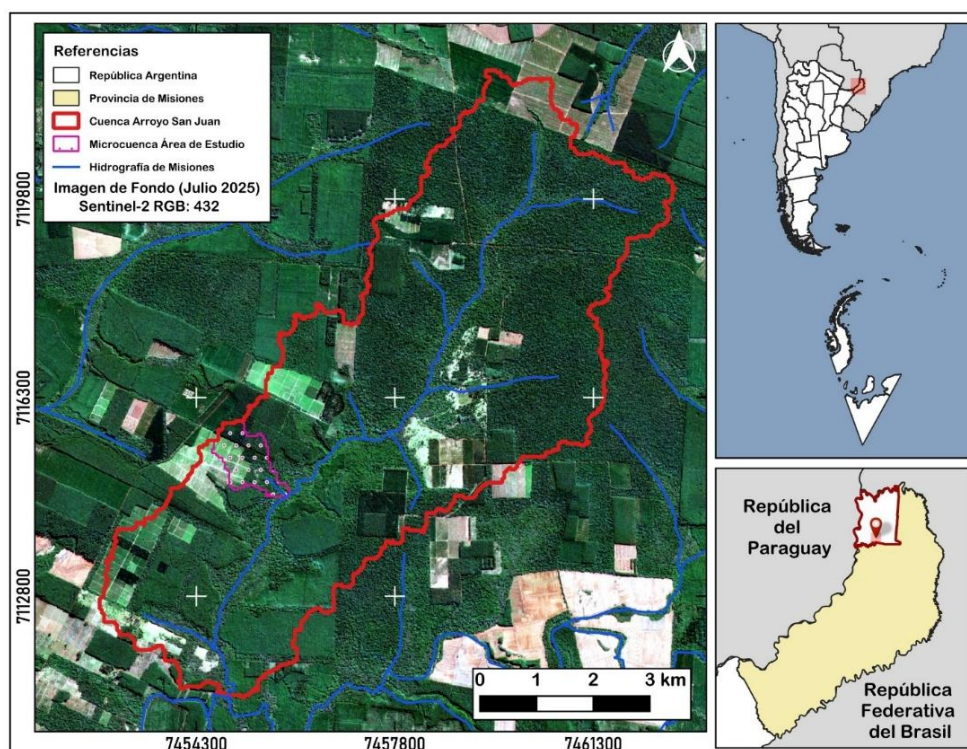


Figura 1. Delimitación de la cuenca y microcuenca de aporte del humedal San Juan.

Asimismo, la delimitación de la microcuenca proporciona una unidad espacial de referencia para la planificación del manejo forestal, permitiendo identificar los sectores donde las intervenciones productivas podrían generar modificaciones sobre el régimen hidrológico del humedal.

El análisis multitemporal mediante imágenes Sentinel-2, complementado con los índices NDVI y NDWI, permitió validar la delimitación del humedal e identificar variaciones en su extensión y en la vegetación asociada, aportando una base objetiva para la definición de los límites y el análisis espacial del sistema.

La delimitación del humedal (3 ha), y la generación de zonas buffer (9,5 ha), seleccionada bajo los criterios topográficos, vegetación circundante y lotes vecinos asociados (Figura 2), permitió establecer una franja de amortiguamiento para orientar el manejo forestal de la microcuenca y minimizar potenciales impactos sobre el régimen hídrico y la biodiversidad. Estas zonas constituyen una herramienta de planificación espacial que facilita la compatibilización de las actividades productivas con la conservación del humedal.

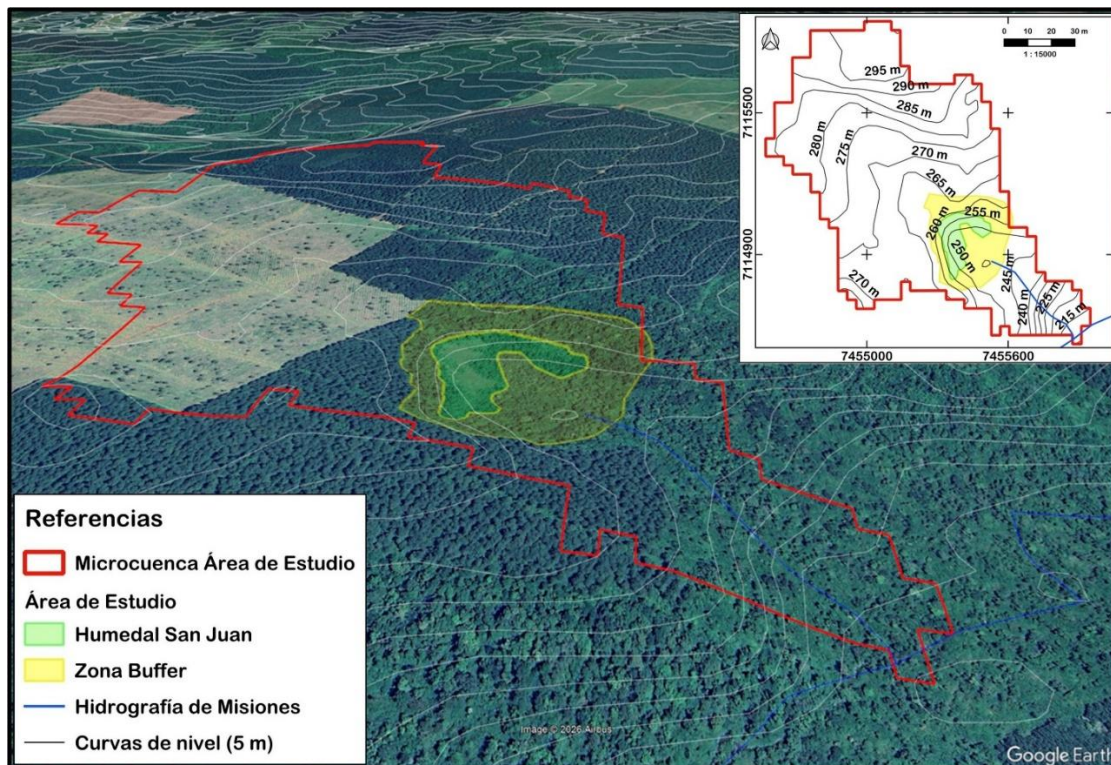


Figura 2. Delimitación del humedal San Juan y establecimiento de la zona Buffer para la conservación y planificación de áreas de manejo contiguas.

La integración de las zonas buffer con la información florística disponible evidencia que estas áreas comprenden sectores de elevada importancia ecológica, favoreciendo la protección de especies de alto valor de conservación y fortaleciendo la conectividad entre el humedal, los remanentes de bosque nativo y la Reserva Aguaraí-mi.

4. CONCLUSIONES

La integración de herramientas de SIG, teledetección y análisis hidrológico permitió delimitar objetivamente la cuenca de aporte, el perímetro del Humedal San Juan y su zona de amortiguamiento, generando información espacial de utilidad para la planificación del sector circundante al área de estudio. El análisis multitemporal mediante imágenes Sentinel-2 complementó la delimitación del humedal al identificar la dinámica de la cobertura vegetal y del agua superficial, fortaleciendo la definición de áreas prioritarias para la conservación.

Los resultados obtenidos aportan evidencias para comprender el funcionamiento ecológico del humedal, por lo que las estrategias de conservación deben trascender los límites del cuerpo de agua e incorporar su entorno inmediato. En este contexto, la delimitación de zonas buffer constituye una medida de planificación que contribuye a reducir potenciales impactos de las actividades productivas de la región, favoreciendo la protección de especies de alto valor de conservación y la conectividad con



los remanentes de bosque nativo como la Reserva Aguará-mi. La metodología desarrollada resulta replicable en otras unidades de gestión y aporta una base técnica para compatibilizar la producción con la conservación de humedales de importancia ecológica.

5. LITERATURA CITADA

CONVENCIÓN SOBRE LOS HUMEDALES. 2025. Perspectiva mundial sobre los humedales 2025: Valorar, conservar, restaurar y financiar los humedales. Gland (Suiza): Secretaría de la Convención sobre los Humedales. DOI: 10.69556/GWO-2025-esp.

COSTANZA, R., DE GROOT, R., SUTTON, P., VAN DER PLOEG, S., ANDERSON, S. J., KUBISZEWSKI, I., TURNER, R.K. 2014. Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change*, 26, 152-158.

HADDAD, N.M., BRUDVIG, L.A., CLOBERT, J., DAVIES, K.F., GONZALEZ, A., HOLT, R.D., TOWNSHEND, J.R. 2015. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science advances*, 1(2), e1500052.

IEZZI, M.E., DI BITETTI, M.S., PARDO, J.M., PAVIOLO, A., CRUZ, P., DE ANGELO, C. 2022. Forest fragments prioritization based on their connectivity contribution for multiple Atlantic Forest mammals. *Biological Conservation*, 266, 109433.

LINDAO, A.A.L., SODRÉ MENDES BARROS, F. 2023. Metodología para la delimitación y caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas a partir de herramientas GIS y Teledetección. En Facultad de Ciencias Forestales (UNaM), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (EEA Montecarlo), & Colegio de Ingenieros Forestales de Misiones (Eds.), XIX Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales: Acta de Resúmenes (pp. 635-639). Universidad Nacional de Misiones. ISSN 2683-7110 (En línea).

MORENO-MATEOS, D., POWER, M. E., COMÍN, F. A., YOCKTENG, R. 2012. Structural and functional loss in restored wetland ecosystems. *PLoS biology*, 10(1), e1001247.

INFORMES TÉCNICOS INTERNOS PINDÓ S.A.:

- INFORME INTERNO PINDÓ S.A. (s. f.) Sitio Prioritario: Humedal San Juan.
- KELLER, H.; ROJAS, L. 2019. Estructura, composición y valor de conservación del bañado Vertientes del San Juan, PINDÓ S.A., depto. Iguazú (Misiones)
- KELLER, H.; ROJAS, L., KELLER, K. 2021. Selección de Áreas Prioritarias para la Conservación (APC) en propiedades de PINDÓ S.A.



ACUMULACIÓN DE ACÍCULAS Y PRECIPITACIÓN COMO DETERMINANTES DE LA FRUCTIFICACIÓN DE *Lactarius deliciosus* EN PLANTACIONES DE *Pinus* EN MISIONES, ARGENTINA

Santiago A. MARTÍNEZ¹, Andrés. A. L. Lindao¹, Débora S. CARDOZO¹

RESUMEN

El estudio analizó la dinámica de fructificación de *Lactarius deliciosus* en un pinar de Misiones entre 2022 y 2026, evaluando su relación con la acumulación de acículas y variables climáticas. La especie, ectomicorrícica asociada a *Pinus*, presentó su mayor fructificación durante junio, con una tendencia decreciente a lo largo del periodo: de 105 basidiomas en junio de 2022 a 48 en junio de 2026. Paralelamente, el espesor de las acículas aumentó de 2 a 23 cm. Si bien se observó una relación negativa entre ambas variables, la correlación de Pearson fue débil y no significativa ($r = -0,294$; $p = 0,330$; $R^2 = 0,086$), por lo que no puede atribuirse la disminución de la fructificación al incremento del mantillo. Los resultados complementan estudios previos que señalaron una capacidad explicativa limitada de los índices de vegetación y una mejora parcial al incorporar variables climáticas. Asimismo, se observaron cambios exploratorios en la distribución espacial de las fructificaciones hacia sectores próximos al borde del pinar. En conjunto, los resultados destacan la importancia de incorporar variables microambientales y edáficas en futuros estudios sobre la fructificación de la especie.

Palabras clave: Fenología; Hongos; Precipitación

1. INTRODUCCIÓN

Lactarius deliciosus es un hongo ectomicorrícico asociado principalmente a especies del género *Pinus*, cuya fructificación depende de la interacción entre factores climáticos y condiciones microambientales del suelo. En la provincia de Misiones, esta especie constituye uno de los hongos comestibles más frecuentes en plantaciones de pino durante la temporada otoñal e invernal. Sin embargo, los factores que regulan su abundancia y distribución espacial aún son poco conocidos.

Estudios previos realizados en un pinar experimental de Eldorado analizaron la relación entre la abundancia de *L. deliciosus* y variables obtenidas mediante teledetección, observándose una débil asociación entre la producción de basidiomas y los índices de vegetación (NDVI) y humedad (NDMI), sugiriendo la influencia de factores ambientales locales no contemplados en dichos modelos (Erruvidarte y Martínez, 2024). Posteriormente, la incorporación de variables climáticas permitió mejorar parcialmente la capacidad explicativa de los análisis, aunque persistió una importante proporción de variabilidad asociada a características propias del sitio (Martínez et al., 2025). Asimismo, estudios fenológicos desarrollados en la región determinaron que la especie presenta su principal período de fructificación entre junio y agosto, registrándose los máximos de producción durante el inicio del invierno (Martínez, 2026).

Considerando estos antecedentes, resulta necesario profundizar el estudio de variables microambientales capaces de influir sobre la fructificación de la especie. Entre ellas, la acumulación de acículas constituye un componente relevante debido a su efecto sobre las condiciones físicas del suelo, la retención de humedad y los procesos de descomposición de la materia orgánica. En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo evaluar la variación temporal de la abundancia de *Lactarius deliciosus* en una parcela permanente de monitoreo entre 2022 y 2026, analizando su relación con la acumulación progresiva de acículas y las condiciones climáticas registradas durante el período de estudio.

¹ Facultad de Ciencias Forestales – UNaM, Bertoní 124, Eldorado, Misiones, Argentina

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en un pinar ubicado en la provincia de Misiones, Argentina (Figura 1), donde se monitorea de manera permanente la fructificación de *Lactarius deliciosus*. Se utilizó una parcela circular de observación con un radio de 20 m, establecida en un sector homogéneo del pinar y mantenida sin modificaciones durante todo el período de estudio.

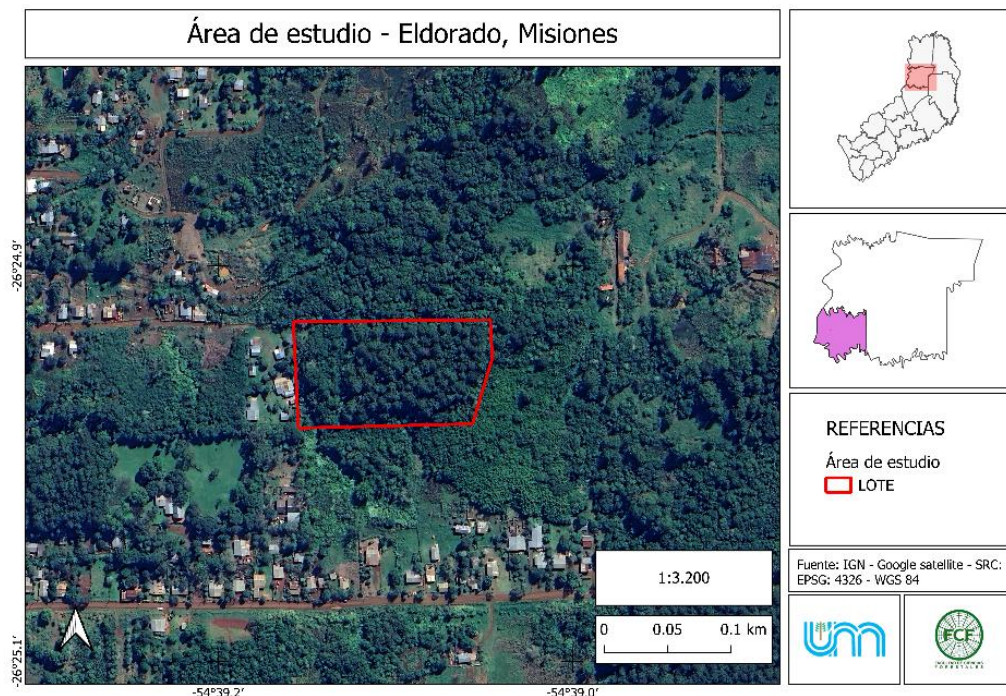


Figura 1. Mapa del Área de trabajo

Los registros fueron obtenidos entre los años 2022 y 2026 mediante observaciones directas realizadas durante la temporada de fructificación de la especie. Las evaluaciones se realizaron una vez por mes (junio, julio y agosto) en cada año de estudio, en simultáneo con las mediciones de espesor de acículas. En cada fecha de muestreo se contabilizó el número total de basidiomas presentes dentro de la parcela, registrándose además el inicio y la finalización del periodo de fructificación observado en campo.

Durante cada período de evaluación se determinó el espesor de la capa de acículas acumuladas sobre el suelo mediante mediciones directas realizadas con una regla graduada en centímetros. El espesor se registró como la distancia comprendida entre la superficie del suelo mineral y la superficie superior de la capa de acículas acumuladas. Las observaciones se realizaron en los meses de junio, julio y agosto, correspondientes al período de mayor actividad de la especie en la región.

Con el fin de evaluar la influencia de las condiciones climáticas sobre la fructificación, se incorporaron registros meteorológicos históricos correspondientes a la estación meteorológica de Eldorado, Misiones. A partir de dichos registros se calculó la precipitación acumulada durante los diez días previos a cada evento de aparición de basidiomas. Este periodo fue seleccionado debido a que diversos estudios han señalado que la respuesta de los hongos ectomicorrícicos a las precipitaciones suele manifestarse luego de varios días de disponibilidad hídrica en el suelo, siendo frecuente la utilización de ventanas temporales comprendidas entre una y dos semanas para analizar la relación entre lluvia y fructificación. Asimismo, se recopilaban datos de temperatura para contextualizar las condiciones ambientales registradas durante los períodos de fructificación.

La información obtenida fue organizada cronológicamente para evaluar la variación temporal de la abundancia de basidiomas, la acumulación de acículas y las condiciones climáticas asociadas a los eventos de fructificación. Se analizaron las relaciones entre el número de basidiomas y el espesor de la capa de acículas mediante análisis de correlación de Pearson y modelos de regresión lineal simple.

Complementariamente, se exploró la relación entre la abundancia de fructificaciones y la precipitación acumulada previa a los eventos de emergencia.

La representación gráfica de los datos incluyó series temporales de abundancia y acumulación de acículas, diagramas de dispersión con líneas de tendencia y gráficos combinados que permitieron visualizar simultáneamente la dinámica de fructificación y los cambios observados en la cobertura de acículas del suelo. Los análisis estadísticos y la elaboración de gráficos se realizaron utilizando el *software* R.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La abundancia de *L. deliciosus* presentó una tendencia general decreciente durante el período de monitoreo comprendido entre 2022 y 2026 (Gráficos 1 y 4). El mayor registro correspondió a junio de 2022, con 105 basidiomas, mientras que en junio de 2026 se contabilizaron 48 individuos. En los años con registros completos de la temporada, la abundancia tendió a ser mayor durante junio y disminuyó hacia julio y agosto, alcanzando en 2025 un valor de 0 basidiomas en agosto.

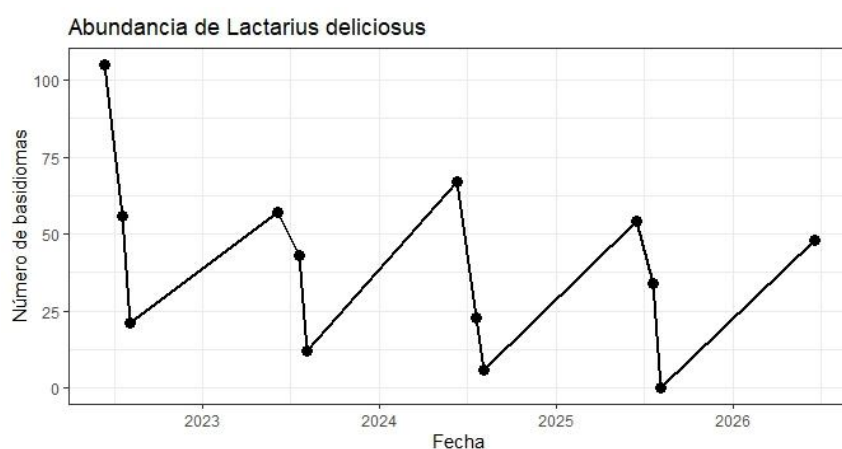


Gráfico 1. Serie temporal de abundancia de *Lactarius deliciosus*

Paralelamente, el espesor de la capa de acículas mostró un incremento sostenido durante el período de estudio (Gráfico 2). En 2022 se registraron valores de 2 cm, mientras que hacia 2026 el espesor alcanzó los 23 cm. Esta variación evidencia una acumulación progresiva de material vegetal sobre la superficie del suelo en la parcela permanente de monitoreo.

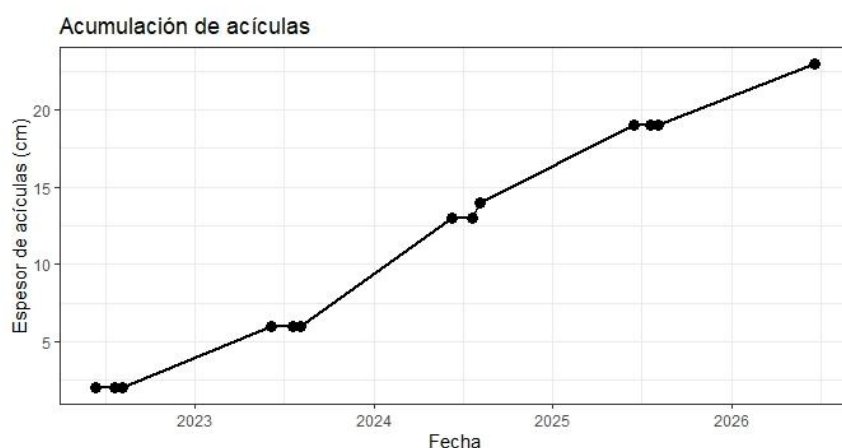


Gráfico 2: Serie temporal de acumulación de acículas.

El análisis conjunto de ambas variables mostró una tendencia inversa entre la abundancia de basidiomas y el espesor de la capa de acículas (Gráfico 3 y 4). Los mayores registros de fructificación coincidieron, en general, con menores espesores de mantillo, mientras que los valores más bajos de

abundancia se observaron en periodos con mayor acumulación de acículas. Sin embargo, el análisis de correlación de Pearson indicó una asociación negativa débil y no significativa entre ambas variables ($r = -0,294$; $p = 0,330$; $R^2 = 0,086$). De manera consistente, el modelo de regresión lineal mostró una pendiente negativa, aunque sin evidencia estadística suficiente para establecer una relación significativa entre el espesor de acículas y la abundancia de basidiomas.

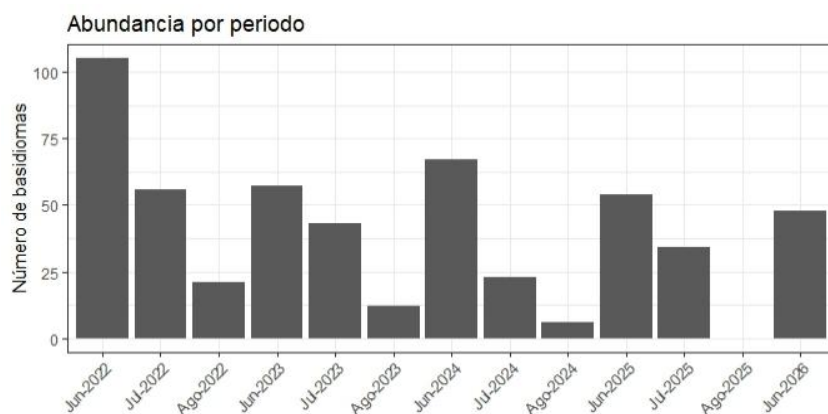


Gráfico 3. Relación entre espesor de acículas y abundancia de basidiomas

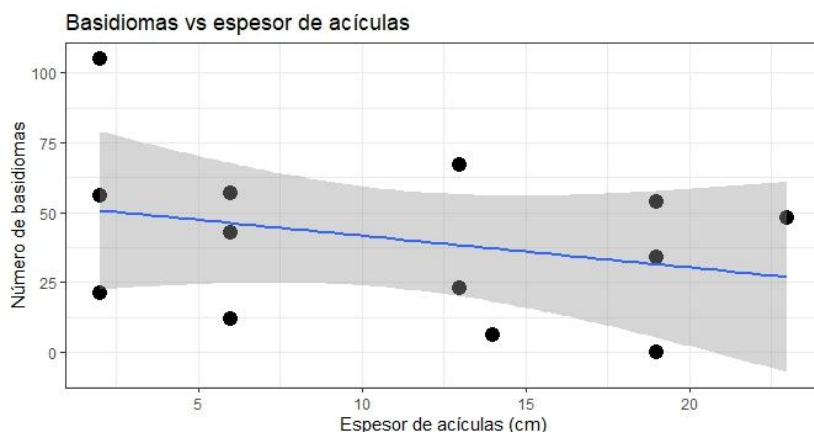


Gráfico 4. Abundancia por período de monitoreo

La distribución temporal de los registros mostró que la mayor producción se concentró principalmente durante junio, particularmente en los primeros años del monitoreo (Gráfico 5). Este comportamiento coincide con los patrones fenológicos previamente descritos para la especie en Misiones, donde la fructificación se concentra entre junio y agosto y presenta sus mayores valores durante el inicio del invierno (Martínez, 2026).

Los resultados obtenidos complementan los antecedentes generados en la misma parcela experimental. Erruvidarte y Martínez (2024) determinaron que los índices espectrales de vegetación y humedad presentaban una baja capacidad para explicar la abundancia de *L. deliciosus*. Posteriormente, Martínez et al. (2025) observaron que la incorporación de variables climáticas mejoraba parcialmente la capacidad explicativa de los modelos, aunque persistía una proporción importante de variabilidad no explicada. En este contexto, los resultados del presente estudio sugieren que las características microambientales asociadas al mantillo podrían constituir una variable complementaria para comprender la dinámica de la fructificación.

La acumulación de acículas puede modificar condiciones físicas y biológicas del suelo, como la retención de humedad, la infiltración, la aireación superficial y los procesos de descomposición de la materia orgánica. No obstante, debido a que la asociación observada no fue estadísticamente significativa, los resultados no permiten establecer que el incremento del mantillo sea responsable de la disminución de

la fructificación. La tendencia negativa observada constituye, en cambio, una señal que debería ser evaluada mediante series temporales más extensas y un mayor número de observaciones.

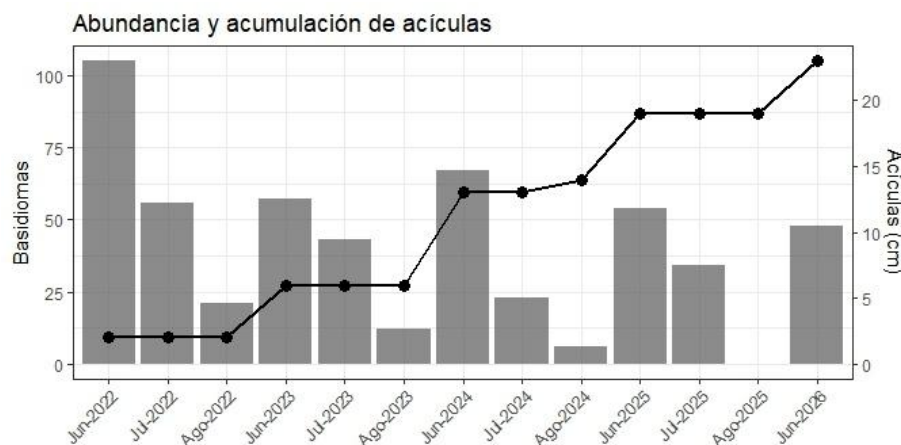


Gráfico 3. Relación temporal entre abundancia y acumulación de acículas

En conjunto, los resultados obtenidos destacan la importancia de incorporar variables microambientales relacionadas con las características del suelo y del mantillo en futuros estudios sobre la ecología de *Lactarius deliciosus*. Si bien la acumulación de acículas presentó una tendencia inversa respecto de la abundancia de basidiomas, la ausencia de una relación estadísticamente significativa indica que su efecto no puede considerarse determinante a partir de los datos disponibles. La incorporación conjunta de variables de mantillo, precipitación, temperatura y condiciones del sitio podría contribuir a explicar con mayor precisión la variabilidad temporal observada en la fructificación de la especie.

4. CONCLUSIONES

El monitoreo realizado entre 2022 y 2026 evidenció una disminución progresiva en la abundancia de *Lactarius deliciosus* dentro de la parcela permanente de estudio, coincidente con un aumento sostenido del espesor de la capa de acículas presente sobre el suelo. La fructificación mantuvo un patrón fenológico estable, concentrándose principalmente durante el mes de junio y disminuyendo hacia julio y agosto.

Los análisis realizados mostraron una asociación negativa entre la abundancia de basidiomas y la acumulación de acículas, sugiriendo que las modificaciones microambientales generadas por el incremento del mantillo podrían influir sobre la producción de fructificaciones. Estos resultados complementan estudios previos desarrollados en el mismo sitio, los cuales indicaron que las variables derivadas de teledetección y las condiciones climáticas explican solo parcialmente la dinámica de la especie.

En conjunto, la información obtenida destaca la importancia de incorporar variables locales asociadas a las características del suelo y del mantillo en futuros estudios sobre la ecología de *Lactarius deliciosus*. Asimismo, las observaciones de campo sugieren posibles cambios en la distribución espacial de las fructificaciones dentro del pinar, aspecto que deberá ser evaluado mediante monitoreos de mayor detalle en investigaciones posteriores.

5. LITERATURA CITADA

- ERRUIDARTE, C. M., & MARTÍNEZ, S. A. 2024. Análisis espacial de la abundancia de *Lactarius deliciosus* mediante índices de vegetación y humedad: Un enfoque micológico basado en la teledetección y muestreo de parcelas. En Actas de las XXXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos.
- MARTÍNEZ, S.A. 2026. Fenología de hongos comestibles en Misiones, Argentina: Síntesis de ciclos de fructificación y patrones estacionales. Revista Yvyrareta, 34. (Suplemento de Resúmenes XX JOTEFA), 299–300.
- MARTÍNEZ, S. A., LINDAO, A.; CARDOZO, C. 2025. Aplicación de índices espectrales y variables climáticas al estudio de hongos en ambientes forestales. En 39.ª Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina.



40^{AÑOS} Jornadas Forestales de Entre Ríos



**Estación Experimental
Agropecuaria Concordia**

