

ISSN 2796-7530

XXXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos

Libro de actas

7 de noviembre de 2025. Concordia, Entre Ríos



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria
Argentina





XXXIX JORNADAS FORESTALES DE ENTRE RÍOS

ACTAS DE DISERTACIONES Y CONTRIBUCIONES VOLUNTARIAS

**7 DE NOVIEMBRE DE 2025
CONCORDIA, ENTRE RÍOS**



**Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria
Argentina**





ORGANIZAN



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria
Argentina



COLABORAN



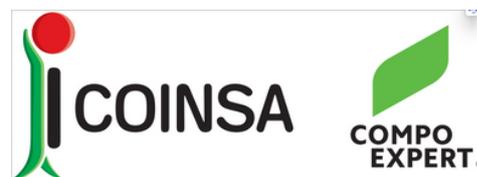


PATROCINAN



JOHN DEERE

Agronorte



CORRIENTES

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



CoPAER

COLEGIO DE PROFESIONALES
DE LA AGRONOMÍA DE ENTRE RÍOS



AGRO-VETERINARIA - SERVICIOS



XXXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos

AUSPICIAN



ACOMPAÑAN





AGRADECIMIENTO ESPECIAL





COMISIÓN ORGANIZADORA

ORGANIZACIÓN GENERAL

EEA Concordia-INTA: Ciro Mastrandrea, Matías S. Martínez, María de los Ángeles García, Leonel Harrand, Carla S. Salto, Carlos de la Peña y Sergio Ramos.

AIANER: Paola Velázquez, Paula Dacunda, Hernán Arriola.

Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial: Mario Flores Palenzona

Consorcio Forestal Río Uruguay (COFRU): Sebastián Alberti

Asociación Forestal Argentina (AFoA): Alejandra Guido

EVALUADORES DE RESÚMENES EXTENDIDOS

Dra. Ing. Agr. Silvana Sione. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Paraná, Entre Ríos.

Dr. Ing. Ftal. Eduardo Hildt. INTA, Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Montecarlo, Misiones.

Dr. Lic. Econ. Demián Olemberg. INTA, Centro de Investigación en Economía y Prospectiva, Buenos Aires.

Dr. Ing. Ftal. Miguel Sarmiento. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

Dr. Ing. Agr. Alejandro Olivera. Universidad de la República Oriental del Uruguay, sede Tacuarembó, Uruguay.

Dr. Ing. Agr. Martin Durante. INTA, EEA Concepción del Uruguay, Entre Ríos

Ing. Ftal. (MSc.) Martín A. Pinazo. INTA, EEA Delta del Paraná, Buenos Aires.

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.) 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 y diagramación: Carla S. Salto

Fotos de tapa: Eduardo Hildt – Matías Martínez



ÍNDICE

PRÓLOGO	1
RECONOCIMIENTO ANUAL	2
DISERTACIONES	3
INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍA SATELITAL, LIDAR Y SIMULADORES DE CRECIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE EXISTENCIAS EN PLANTACIONES FORESTALES EN ARGENTINA.....	4
APLICACIONES DEL LIDAR AEROTRANSPORTADO EN LA GESTIÓN FORESTAL	7
INFORME DE COYUNTURA FORESTO-INDUSTRIAL Y MUEBLERO.....	13
DINÁMICA DE INDICADORES ECONÓMICOS Y PRODUCTIVOS DE LA ACTIVIDAD FORESTAL DEL NORESTE DE ENTRE RÍOS	15
CONSTRUYENDO INDUSTRIA EN ARGENTINA. DEL PROYECTO AL CRECIMIENTO SOSTENIDO	26
CONTRIBUCIONES VOLUNTARIAS	31
FERTILIZACIÓN DE <i>Eucalyptus benthamii</i> MAIDEN & CABBAGE EN ALBARDONES DEL DELTA DEL PARANÁ. RESULTADOS A LOS 6 AÑOS	32
FORESTACIÓN CON CLONES DE HÍBRIDOS COMERCIALES DE <i>Eucalyptus</i> EN EL SURESTE DE SANTIAGO DEL ESTERO, ARGENTINA	36
EVALUACIÓN PRELIMINAR DE CLONES PUROS E HÍBRIDOS DE <i>Eucalyptus</i> EN EL SUR ESTE DE SANTIAGO DEL ESTERO, ARGENTINA	41
RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO DE DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTACIÓN DEL CLON <i>Eucalyptus grandis</i> DDT002136.....	46
POTENCIAL PRODUCTIVO DE CLONES DE EUCALIPTOS EN LA ZONA CENTRO-SUR DE SANTA FE	51
PRESENTACIÓN DE NUEVOS SAUCES MEJORADOS PARA PRODUCCIÓN MADERERA RECIENTEMENTE INSCRIPTOS EN EL INASE	56
PRIMEROS CLONES REGISTRADOS DE <i>Salix humboldtiana</i> Willd. CON ORIGEN EN EL DELTA DEL PARANÁ.....	61
POTENCIAL PARA FITORREMEDIACIÓN DE SAUCE CRIOLLO EN SUELOS CONTAMINADOS DE RIBERA. EVALUACION PRELIMINAR.....	66
ANÁLISIS INTEGRADO DE LA INVERSIÓN FORESTAL, LOS COSTOS DESDE LA MADERA EN PIE, Y COSTOS DE COMPENSACIÓN DE CARBONO FORESTAL PARA LOS BOSQUES PLANTADOS A NIVEL MUNDIAL, 2023.....	70
PRIMEROS AVANCES EN LA HUELLA DE CARBONO DE LA COSECHA DE MADERA	80
IMPACTO DE LA DENSIDAD Y EL TURNO DE CORTA EN LA PRODUCCIÓN DE <i>Eucalyptus grandis</i> PARA USOS SÓLIDOS.....	90
NIVEL SONORO EN MÁQUINAS DE COSECHA FORESTAL EN SISTEMA FULL TREE	94
ANÁLISIS EXPLORATORIO DEL POTENCIAL DENDROENERGÉTICO DE <i>Eucalyptus sideroxylon</i> EN DOS EDADES CONTRASTANTES.....	98
RESPUESTA INICIAL DE MATERIALES DE <i>Eucalyptus</i> EN LA CUENCA DEL SALADO	103
CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE 7 TAXONES DE PINO MEDIANTE TÉCNICAS ACÚSTICAS.....	108
PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO A PARTIR DE VIBRACIÓN TRANSVERSAL.....	113



EJECUCIÓN DE INVENTARIOS FORESTALES EN EL DELTA DEL PARANÁ USANDO TECNOLOGÍA LiDAR	118
¿QUE NOS PUEDEN DECIR LOS DATOS DEL SEGUNDO INVENTARIO NACIONAL DE BOSQUES NATIVOS SOBRE LOS BOSQUES MADERABLES DEL ESTE DE FORMOSA?	123
CRECIMIENTO DEL GUATAMBÚ (<i>Balfourodendron riedelianum</i> , Rutaceae) CON RELACIÓN AL TAMAÑO DEL ÁRBOL Y EL CONTEXTO DE COMPETENCIA EN BOSQUES NATIVOS (MISIONES, ARGENTINA) COMO INSUMO PARA SU PROMOCIÓN FORESTAL	128
MODELOS ALTURA DIÁMETRO PARA TRES ESPECIES DE QUEBRACHOS DEL PARQUE CHAQUEÑO, ARGENTINA	132
RELACIONES ENTRE VARIABLES DASOMÉTRICAS DE BOSQUES NATIVOS DE LA PROVINCIA DEL CHACO, ARGENTINA	137
IMPORTANCIA DEL TEMPERAMENTO DE LEÑOSAS EN SISTEMAS DE USO MÚLTIPLE EN EL BOSQUE DE TRES QUEBRACHOS EN LA REGIÓN CHAQUEÑA, ARGENTINA.....	142
IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES PARA LA INSTALACIÓN DE APIARIOS MEDIANTE HERRAMIENTAS GEOMÁTICAS EN PUERTO LIBERTAD, MISIONES ARGENTINA.....	147
ABUNDANCIA Y MONITOREO DE <i>Lactarius deliciosus</i> EN UN PINAR EXPERIMENTAL DE MISIONES: INTEGRACIÓN ÍNDICE DE HUMEDAD NORMALIZADA Y VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	151



PRÓLOGO

Una vez más, las Jornadas Forestales de Entre Ríos convocan a productores, empresas de servicios e insumos, técnicos, docentes y estudiantes, para ofrecer charlas de expertos y, en esta edición, visitas a industrias forestales de la zona. Con un formato ágil y adaptado al interés diverso de los asistentes, se propone, además, brindar el espacio para compartir tecnologías y experiencias, concretar alianzas y gestiones comerciales, y analizar los desafíos y oportunidades del sector forestal.

Las charlas técnicas se agrupan en dos ejes: aplicación de tecnología satelital, de drones y LiDAR a inventarios forestales, e innovación en la industria y mercado forestal. Además, se suman los trabajos voluntarios que enriquecen y jerarquizan estas jornadas. Las Actas digitales contienen las disertaciones y los trabajos voluntarios, y constituyen material de consulta y de actualización profesional para consulta en línea o descarga.

El núcleo del primer eje temático es la aplicación de tecnología de imágenes para la caracterización y cuantificación indirecta de los recursos forestales, insumos clave para la planificación y gestión forestal. Para abordar inicialmente estos temas, Eduardo Hildt y Cristhian Carazzo presentan los resultados comparativos del uso de tecnología LiDAR y de fotogrametría para la caracterización de rodales y relevamiento topográfico, con aplicación directa a la planificación y gestión de las plantaciones. Como complemento, Matías Gaute desarrolla la metodología y herramientas tecnológicas aplicadas para la actualización del inventario forestal nacional, donde la combinación de imágenes satelitales y simuladores de crecimiento permiten estimar existencias, cambios de cobertura, y realizar análisis temporales de los recursos forestales.

El segundo eje de disertaciones abarca aspectos de gestión y economía. En primer lugar, Agustín Kiczka, coordinador de abastecimiento productivo, y Raúl Rotzen, jefe de ventas de Acon Timber, uno de los principales aserraderos del país, comparten el proceso de establecimiento y crecimiento de la planta, que se basa en transformación de materia prima de bosques con manejo sustentable y economía de “cero desperdicios”. Así mismo, plantean las perspectivas de mercado y su impacto en el desarrollo regional.

El mercado de la madera y el mueble continúan en un estado de fragilidad. Gustavo Cetrángolo y Fernando Couto desmenuzan esta situación al referirse a la producción industrial, el comercio exterior, la demanda interna, y sobre el mercado del mueble, entre otros puntos relevantes. Analizan las variaciones durante este año y respecto del año pasado, así como las condiciones que favorecen la estabilidad productiva. Finalmente, técnicos del INTA Concordia describen la dinámica del sector en los últimos 10 años, con énfasis en la pospandemia, en base a indicadores productivos y económicos que permiten comparar los cambios y tendencias en el periodo considerado.

Una nueva edición es posible gracias al apoyo de quienes auspician y publicitan en estas Jornadas, de las instituciones que colaboran, y de quienes asisten año a año. ¡A cada uno, gracias!

Comisión Organizadora XXXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos



RECONOCIMIENTO ANUAL

La Ing. Agr. Teresa Cerrillo, hija de productores, nació y creció en las islas del Delta del Paraná, lo que marcó desde temprano su vínculo con la región. Es egresada de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires y especialista en Mejora Genética Vegetal por el Centro Internacional de Altos Estudios Agronómicos Mediterráneos (CIHEAM).

Desde hace más de tres décadas se dedica a la investigación y mejoramiento genético de sauces en la Argentina. El inicio de su trayectoria profesional tuvo lugar en el Centro de Investigación y Estudios Forestales (CIEF) y desde el año 2004 se desempeña como investigadora de la Estación Experimental Delta del Paraná (INTA), donde lidera el Programa de Mejoramiento Genético de Sauces con impacto directo en la producción forestal del Delta y otras regiones del país desde la Patagonia hasta el NOA. Entre sus numerosos aportes se destaca la obtención e inscripción en INASE de 12 cultivares mejorados de sauces maderables orientados a distintos usos industriales, energéticos y ambientales, 5 cultivares de mimbres mejorados y 8 cultivares de sauces nativos (*Salix humboldtiana*) para restauración ecológica y otras aplicaciones. Por otra parte, inscribió creaciones fitogenéticas precedentes que abarcan 5 cultivares de sauce, 3 de mimbre y 1 de álamo de relevancia para el sector productivo, y rescató para su conservación una decena de variedades de ciruelos históricos de la región del Delta del Paraná. La obtención de sauces “doble propósito” (con alta calidad para usos sólidos y para la elaboración de papel para diarios y embalaje) es el resultado de una alianza estratégica público-privada, y marca un hito para la cadena de producción forestal con beneficio potencial para los distintos actores desde los viveristas hasta la industria.



Teresa ha representado a INTA y a la Argentina en convenios nacionales e internacionales, como el acuerdo con Papel Prensa, la colaboración con el Centro de Ricerca Foreste e Legno (CREA FL) de Italia, y el Grupo de Trabajo en Genética, Mejoramiento y Conservación de la Comisión Internacional del Álamo (IPC/FAO) el cual integra desde el año 2000 y lidera desde el 2022.

Su labor ha sido reconocida con premios nacionales e internacionales, entre ellos la Distinción Honorífica de la IPC/FAO (en 2012) por sus sobresalientes aportes en el campo del cultivo del álamo y del sauce; el reconocimiento del Consejo de Productores del Delta (en 2016) por la labor científica en pos del desarrollo regional; el Premio a la Trayectoria Ing. Raúl Marsán de la Asociación Forestal Argentina (en 2020); y un nuevo reconocimiento del Consejo de Productores del Delta (en 2024) por su aporte al sector forestal a través del mejoramiento genético de sauces.

Con una trayectoria marcada por su fuerte vocación y compromiso con la ciencia aplicada y el desarrollo forestal sostenible, Teresa Cerrillo es hoy una referente internacional en el mejoramiento genético de salicáceas y un orgullo para nuestra institución.

DISERTACIONES



INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍA SATELITAL, LiDAR Y SIMULADORES DE CRECIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE EXISTENCIAS EN PLANTACIONES FORESTALES EN ARGENTINA

Ing. Agr. Matías Carlos GAUTE¹

Uno de los principales objetivos de la Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial es la promoción y el monitoreo cuali-cuantitativo de las plantaciones forestales a escala nacional, determinando su evolución en términos de superficie y otras variables de estado que las caracterizan. Debido a la extensión del territorio bajo análisis, la deficiente accesibilidad en determinados sitios y los costos logísticos correspondientes a relevamientos a campo, los datos de teleobservación se presentan como una herramienta idónea para la caracterización y cuantificación de los bosques. La dimensión espacial es adecuada para el monitoreo de la dinámica, producto de acciones naturales y antropogénicas. En tanto, la escala temporal permite análisis históricos a partir de las diferentes misiones, como, por ejemplo, los correspondientes a la serie Landsat disponibles desde el año 1972, y de otras tantas plataformas satelitales. Asimismo, son abundantes las experiencias en las que, empleando estos recursos, se logra caracterizar y cuantificar los cambios a escala global. Por otra parte, se dispone de softwares específicos para simular el crecimiento de los principales géneros implantados. Estas herramientas de vanguardia mejoran los diagnósticos y la planificación forestal.

La región Mesopotamia Argentina, concentra la mayor parte de la superficie de bosques cultivados del país, donde predominan los géneros *Pinus* y, en menor proporción, *Eucalyptus*. Durante el año 2024, se realizó un trabajo para determinar, en esta región, la superficie de plantaciones forestales y estimar el volumen de madera rolliza con corteza presente en ellas.

Como insumo base para esta evaluación, desde el área de Sistemas de Información Geográfica (SIG) de la DNDFI se realizó la actualización y estratificación de la cartografía del área de estudio, valiéndose de distintas herramientas geomáticas disponibles y fuentes de información, siendo de gran valor los datos recopilados durante muchos años, producto de la gestión de la Ley 25.080. Simultáneamente, se definieron los manejos silvícolas modales para cada género/especie y zona/provincia, validados por los técnicos que componen el área de Extensión, en interacción en el territorio con los productores y empresas, y la revisión de los manejos silvícolas más utilizados en los expedientes de la Ley 25.080, llevada a cabo por el área Técnica de la DNDFI. Una vez definidos los esquemas de manejo silvícola, se utilizó un simulador de crecimiento forestal (PlaForNEA – INTA Montecarlo) para estimar los volúmenes de madera acumulados a distintas edades, en función de parámetros acordes al manejo definido para cada zona.

Complementariamente, para aquellas especies o clones puros/híbridos de los géneros evaluados para los que el simulador no ofrece proyectos para su análisis, se tomaron en cuenta datos de crecimiento a campo, obtenidos de mediciones propias y datos proporcionados por productores y empresas, como resultado de sus inventarios internos.

A partir del insumo cartográfico, el relevamiento de la información territorial y el simulador de crecimiento forestal fue posible realizar una determinación del volumen con corteza de los bosques cultivados en la región Mesopotamia, para los géneros *Pinus* y *Eucalyptus*. Como resultado de este abordaje interdisciplinario, se presenta una aproximación a la superficie y volumen con corteza correspondientes a los bosques cultivados de *Pinus* y *Eucalyptus* en la región Mesopotamia, para el mes de septiembre de 2024 (Figura 1).

¹ Área SIG e Inventario Forestal. Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial. Subsecretaría de Producción Agropecuaria y Forestal. Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca - Ministerio de Economía.

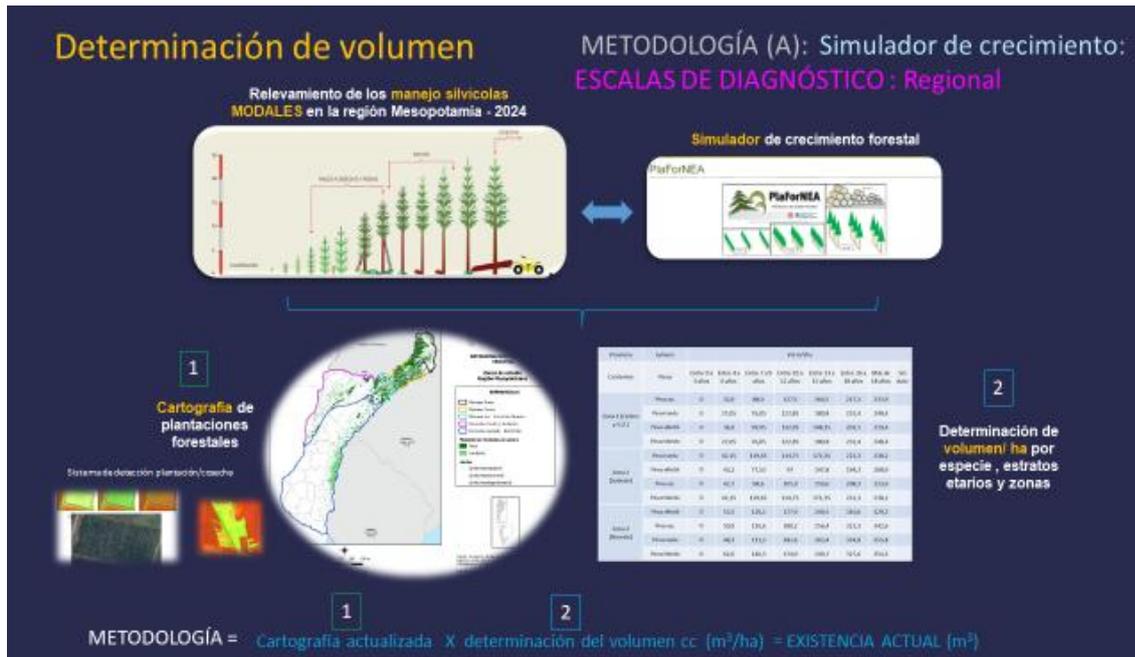


Figura 1. Metodología para la determinación del volumen cc en la región Mesopotamia.

Nuevas herramientas y metodologías

La DNDFI cuenta con diversas herramientas e infraestructura para gestionar la información espacial de datos provenientes de la actividad forestal, generando información estratégica para el sector y para los tomadores de decisiones (Figura 2).



Figura 2. Flujo conceptual de trabajo para la actualización de la información.

En el proceso de actualización de la base de datos de la cartografía de plantaciones, las nuevas tecnologías disponibles posibilitan la identificación de aquellas forestaciones que experimentan cambios en su cobertura, debido a la presencia de incendios forestales y/o aprovechamientos forestales. A través del procesamiento de información de grandes volúmenes de imágenes satelitales, se obtienen entonces mapas de cambios interanuales (forestaciones, reforestaciones, aprovechamientos, pérdidas) en las plantaciones forestales. Este insumo colabora en las tareas de monitoreo, vinculando las áreas detectadas con la información cartográfica y favoreciendo su actualización de manera eficiente (Figura 3).

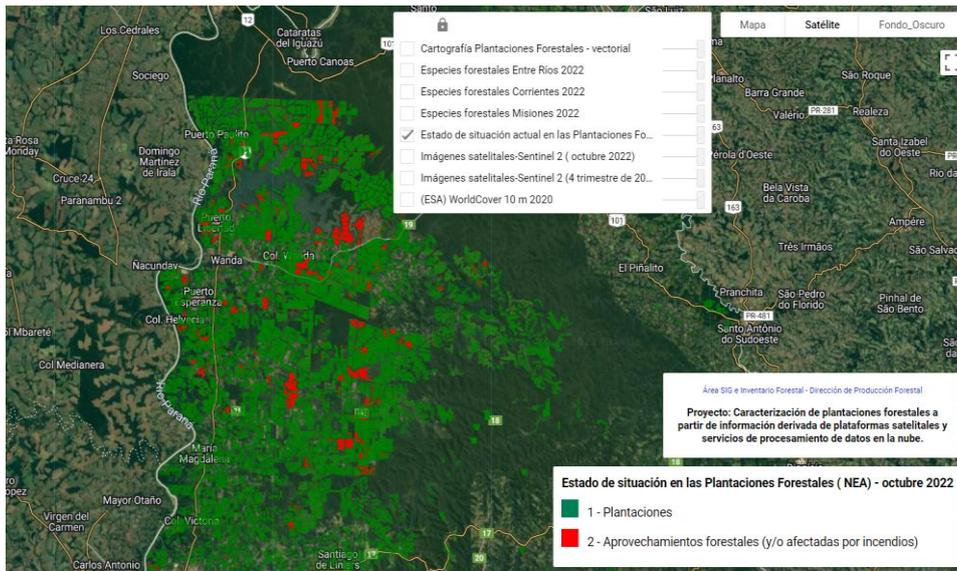


Figura 3. Sistema de detección de cambios

Afortunadamente, las nuevas tecnologías y plataformas satelitales permiten estimar variables y complementar con las tradicionales mediciones en terreno. En este sentido, plataformas satelitales como el satélite ICESAT 2 (Light Detection and Ranging) y el satélite GEDI (Global Ecosystem Dynamics Investigation), entre otras, permiten obtener datos altimétricos de los rodales, de manera que se puedan calibrar modelos predictivos para obtener mapas de altura. (Figura 4). Asimismo, en la SAGyP y el INTA se dispone de drones con sensores LiDAR, que brindan mayores detalles a escala de lote e individuo.

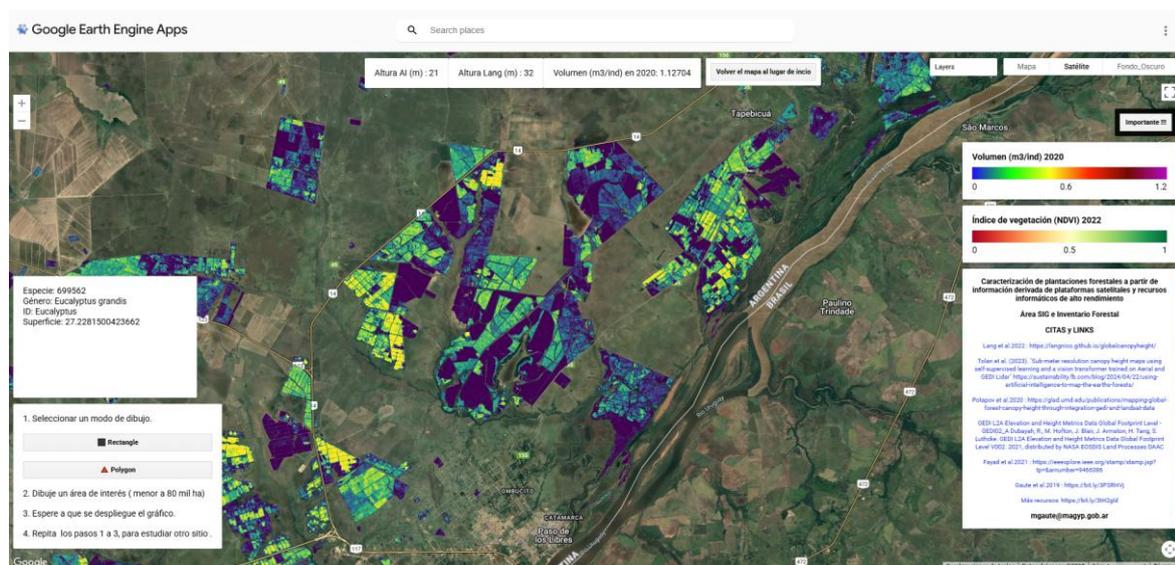


Figura 4. Productos satelitales para la determinación de variables de estado.

Sobre la base de estas nuevas metodologías, utilizadas de manera integrada, será posible realizar diagnósticos con mayor precisión a distintas escalas (regional, provincial, departamental, lote e individuo).

Nuevos desafíos

Las plantaciones forestales son un recurso estratégico, capaces de generar empleo, atraer inversiones, diversificar las economías regionales y, al mismo tiempo, responder a la creciente demanda global de madera, fibras y energías renovables. Resulta fundamental seguir avanzando en la integración de tecnologías de vanguardia a los flujos de trabajo de la DNDFI, para mejorar los diagnósticos respecto a la oferta de los activos forestales.



APLICACIONES DEL LiDAR AEROTRANSPORTADO EN LA GESTIÓN FORESTAL

Eduardo HILDT¹, Cristhian CARAZZO²

RESUMEN

La tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) constituye una herramienta avanzada para la caracterización tridimensional de ecosistemas forestales. Este trabajo evalúa comparativamente el desempeño de LiDAR aerotransportado montado en drones versus fotogrametría tradicional para la caracterización estructural de rodales de *Pinus taeda* en Misiones, Argentina. Se relevaron 43 hectáreas de plantaciones de 5 y 11 años utilizando un sistema LiDAR (DJI Matrice 350 RTK con sensor YellowScan Mapper+, 360 pts/m²) y fotogrametría con dron de consumo (DJI Air2S, 500 pts/m²). El relevamiento LiDAR logró penetrar el dosel y generar un Modelo Digital de Terreno preciso, capturando la topografía real del terreno, la red de drenaje y los caminos forestales. En contraste, la fotogrametría mostró limitaciones severas en áreas con cobertura densa, donde la imposibilidad de observar el suelo entre las copas provocó una sobreestimación del nivel del terreno de hasta 3-5 metros. Estos errores en el Modelo Digital de Terreno se propagaron a la normalización de alturas, generando subestimaciones sistemáticas en los Modelos de Altura de Copas derivados de fotogrametría. Los resultados demuestran que el LiDAR es superior a la fotogrametría para caracterización estructural bajo dosel denso, constituyendo una herramienta esencial cuando se requiere información precisa del terreno y de la estructura vertical de la vegetación para la toma de decisiones silviculturales.

Palabras clave: *LiDAR, gestión forestal, UAV/drones, relevamientos aerotransportados, bosques implantados*

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología LiDAR (*Light Detection And Ranging*) es una técnica de teledetección activa que emplea pulsos láser para medir distancias y generar modelos tridimensionales de terreno y vegetación (Hyypä et al., 2008). Su funcionamiento se basa en la emisión de pulsos de luz láser y la medición del tiempo de retorno al sensor, lo que permite determinar con exactitud la distancia a diferentes puntos de la superficie terrestre.

Las aplicaciones LiDAR se han diversificado en las últimas décadas, adoptando distintas plataformas según la escala y los objetivos del relevamiento. Los sistemas aerotransportados (ALS) en aeronaves tripuladas son la tecnología más consolidada para inventarios forestales extensivos, ofreciendo un equilibrio entre cobertura, densidad de puntos (5–20 pts/m²) y eficiencia operativa desde alturas de vuelo de 500 a 2000 m (Wulder et al., 2012). Los ALS montados en drones (UAV) constituyen una alternativa flexible y de alta resolución (100–500 pts/m²), especialmente útil en áreas acotadas o de difícil acceso, aunque limitados en autonomía (Wallace et al., 2016). En escalas menores, el LiDAR terrestre (TLS) y los sistemas móviles basados en SLAM permiten caracterizar estructuras individuales o capturar información continua a nivel de parcela (Liang et al., 2016; Bauwens et al., 2016). A nivel global, las misiones satelitales como GEDI e ICESat-2 proporcionan cobertura planetaria con resoluciones más gruesas (*footprints* de ~25 m), resultando valiosas para estimaciones de biomasa y estructura forestal regional o continental (Dubayah et al., 2020).

¹ Dr. Ingeniero Forestal INTA EEA Montecarlo. hildt.eduardo@inta.gob.ar

² Ingeniero Forestal Arauco Argentina. cristhian.carazzo@arauco.com



Una característica distintiva de los sistemas LiDAR es la capacidad de registrar múltiples retornos por cada pulso láser emitido, a medida que diferentes porciones del haz interactúan con diversos objetos presentes en la escena. De esta forma, un relevamiento aéreo LiDAR (ALS) puede captar no solo el perfil del dosel del bosque, sino que también consigue obtener información sobre estructuras intermedias, como ramas y sotobosque, y, fundamentalmente, sobre el nivel del terreno existente debajo de la vegetación. La capacidad para registrar puntos que alcancen el nivel del terreno depende de múltiples factores, incluyendo la densidad de la vegetación, la frecuencia de pulsos del sensor láser (típicamente 100.000-500.000 pulsos/s para sensores montados en drones) y los parámetros de vuelo empleados en el relevamiento, tales como la altura, el patrón y la velocidad.

El producto final de un relevamiento ALS es una nube de puntos tridimensional (3D) que describe las elevaciones del terreno y de todos los elementos presentes en el área estudiada. Estos datos se almacenan y comparten en archivos con formato LAS o su versión comprimida LAZ, y codifican información esencial para el análisis posterior, como el sistema de referencia de coordenadas, las coordenadas X, Y, Z de cada punto, la intensidad de la energía retornada, el número de retorno obtenido y el total de retornos por pulso, la línea de vuelo a la que pertenece cada punto, el ángulo de emisión del pulso y la clasificación asignada a cada punto.

Luego de la obtención de la nube de puntos por medio del relevamiento aéreo, se aplica una serie de pasos de preprocesamiento comunes. En primer lugar, la nube de puntos se recorta para adecuarla al área de interés, definiendo sus bordes y reduciendo el volumen de datos a manejar. A continuación, puede realizarse un submuestreo para ajustar la densidad de la nube de puntos a las necesidades de los análisis posteriores. En esta etapa, es posible también homogeneizar la densidad muestreando un mayor número de puntos en zonas con menor densidad inicial. Finalmente, se realiza el filtrado de los datos, eliminando puntos duplicados y valores atípicos (*outliers*) mediante criterios estadísticos, típicamente removiendo aquellos puntos ubicados más allá de 2-3 desviaciones estándar respecto a la media local.

Posteriormente, se aplica un algoritmo para la detección del terreno y la consecuente clasificación de la nube de puntos en "puntos del terreno" y "puntos que no corresponden al terreno". Para esta tarea, suele emplearse el algoritmo CSF (*Cloth Simulation Filter*), propuesto por Zhang et al. (2016). Esta clasificación es fundamental porque permite discriminar claramente el terreno de la vegetación que lo cubre. A partir de los puntos clasificados como terreno, se ajusta un Modelo Digital de Terreno (MDT), generalmente con una resolución inferior a 1 m/píxel. Este modelo puede procesarse mediante la aplicación de un filtro focal de medias para conseguir suavizarlo y reducir la presencia de artefactos causados por el micro relieve o por zonas donde la vegetación densa impidió el relevamiento completo del suelo.

Finalmente, restando a la nube de puntos la elevación del terreno modelada en el paso anterior, se obtiene una nube de puntos normalizada, donde todas las alturas quedan expresadas como distancias verticales relativas al nivel del suelo. A partir de esta nube de puntos normalizada, puede generarse un *raster* denominado Modelo de Altura de Copas (CHM) que describe la altura de la vegetación que conforma el dosel del bosque. También pueden extraerse otras métricas a resoluciones mayores, con el objetivo de describir la distribución vertical de la vegetación, incluyendo la altura máxima, la altura a la que ocurre cada percentil de la distribución de puntos, la desviación estándar y la asimetría de dicha distribución, entre otras.

En este resumen se presenta una experiencia que se analizó un rodal de *Pinus taeda* en Misiones, empleando una combinación de LiDAR ALS y fotogrametría con drones.

2. METODOLOGÍA

Para evaluar comparativamente las capacidades de los relevamientos LiDAR en relación con las técnicas de relevamiento basadas en fotogrametría con drones de consumo, se eligió un conjunto de rodales de *Pinus taeda* en la localidad de Montecarlo, plantados en 2014 y 2020 (11 y 5 años al momento del relevamiento, respectivamente). Los rodales fueron manejados con el objetivo de obtener



productos pulpables, sin realizar raleos ni podas. El predio presenta un relieve ondulado, con una zona de fuertes pendientes y la cabecera de un curso de agua. El rodal de plantado en 2020 presenta una alta heterogeneidad espacial debido a fallas en el establecimiento por las sequías y al ataque de hormigas. El área efectiva para relevar totalizó 43 ha.

Para el relevamiento LiDAR se empleó un dron DJI Matrice 350 RTK equipado con un sensor LiDAR YellowScan Mapper+ (frecuencia de pulso: 240.000 Hz, hasta tres retornos por pulso, alcance efectivo de 100 m). Como complemento del escaner se utilizó una estación base GNSS Kolida K9s. La planificación del relevamiento se realizó con ayuda del software UgCS, diseñando un plan de vuelo en fajas paralelas con orientación 21° respecto al norte, a una altura de vuelo de 70 m respecto del nivel del terreno, con una velocidad de vuelo de 10 m/s y un solape lateral del 60 % (Figura 1A). El plan de vuelo también incluyó la realización de una línea de vuelo transversal a las líneas del relevamiento para facilitar el ajuste de tiras durante el postproceso, y la ejecución de una figura en forma de "8" para la calibración de la Unidad de Medición Inercial (IMU) del escáner al inicio y al final de la misión. El vuelo tuvo una duración de 20 minutos. Los datos capturados fueron preprocesados por medio del software YellowScan CloudStation, obteniendo como resultado una nube de puntos en formato LAZ, con una densidad de 360 pts/m².

Simultáneamente, se planificó y ejecutó un relevamiento aerofotogramétrico empleando un dron DJI Air2S, equipado con una cámara de 20 mpx. Para poder georreferenciar y corregir el relevamiento se colocaron en terreno 19 puntos de control (GCP) relevados por medio de un rover GNSS Kolida K9s trabajando en RTK junto con la base anteriormente mencionada. Para planificar el vuelo y controlar el dron se empleó la aplicación Dronelink (Figura 1B). El relevamiento se realizó volando a una altura de 120 m respecto del nivel del terreno, con un patrón de fajas paralelas contemplando un solape frontal del 85% y un solape lateral del 80%. La cámara se orientó con un ángulo de inclinación de 85° respecto a la horizontal. En total se obtuvieron 746 fotografías que fueron procesadas por el software Agisoft Metashape para obtener un mosaico aerofotogramétrico con una resolución de 3,5 cm/px y una nube de puntos en formato LAZ con una densidad de 500 pts/m².

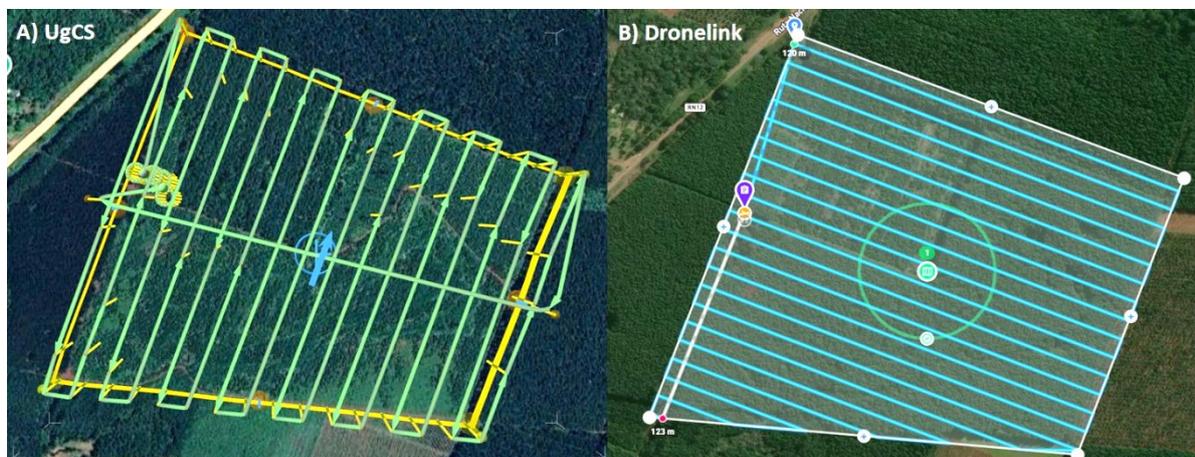


Figura 1. Trazado de los planes de vuelo realizados para el relevamiento LiDAR (A) y fotogramétrico (B).

El análisis de los datos se realizó con ayuda del paquete lidR para R (Roussel et al., 2020) y empleando la metodología presentada por Dalla Corte et al. (2022). En ambos casos (LiDAR y fotogrametría), la secuencia de análisis implicó el recorte de la nube de puntos a los límites de los rodales, el submuestreo hasta una densidad de 100 pts/m² para reducir el peso de los datos y conseguir una densidad homogénea, la limpieza de outliers, la clasificación de los puntos correspondientes al terreno, la obtención de un Modelo Digital de Terreno y sus curvas de nivel asociadas, la normalización de la nube de puntos y el cálculo del Modelo de Altura de Copas (CHM).



3. RESULTADOS

El cálculo del Modelo Digital de Terreno, basado en los puntos más bajos identificados por el algoritmo CSF (Zhang et al., 2016), evidenció diferencias marcadas entre ambos métodos. En el relevamiento LiDAR, la energía emitida por el sensor logró penetrar entre las copas y en los claros, alcanzando la vegetación herbácea y el suelo. La capacidad de registrar hasta tres retornos por pulso permitió obtener puntos cercanos al terreno incluso en las zonas más densas del rodal. En consecuencia, el MDT y las curvas de nivel representaron de forma consistente la pendiente del terreno, los saltos de nivel de los caminos y la red de drenaje en la zona baja (Figura 2A). En cambio, la fotogrametría solo reconstruyó las capas superiores del dosel, visibles para la cámara del dron al momento de la captura. La información del suelo se limitó a los claros, caminos o huecos entre copas, por lo que el algoritmo de clasificación identificó frecuentemente vegetación intermedia como puntos de terreno, sobrestimando su nivel y generando zonas artificialmente elevadas en áreas de alta cobertura (Figura 2B).

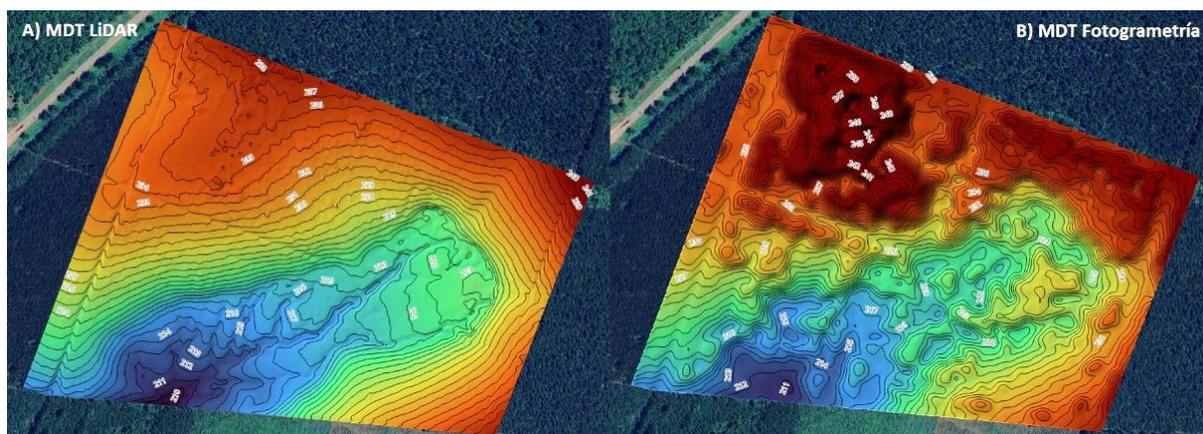


Figura 2. Comparación entre los Modelos Digitales de Terreno obtenidos por medio del relevamiento LiDAR (A) y fotogramétrico (B).

Estas diferencias también se pueden apreciar cuando se observa la distribución de los puntos en un corte vertical siguiendo un transecto realizado en la zona media de la cuenca hídrica, transversal a la red drenaje principal (Figura 3). Ambas nubes de puntos representan adecuadamente la estructura del dosel superior, capturando el perfil de las copas y los claros existentes. Sin embargo, mientras que en el perfil LiDAR se observa una buena representación de puntos cercanos al suelo, en la nube de puntos fotogramétrica únicamente se observa el suelo en los claros. Por este motivo, el MDT calculado a partir de la fotogrametría tiende a sobreestimar el nivel del terreno.

Finalmente, los errores generados en la estimación del nivel del terreno en el relevamiento aerofotogramétrico se trasladan al proceso de normalización de la nube de puntos (resta del nivel del terreno). Por ello, los Modelos de Altura de Copas (CHM) calculados a partir de estos datos anómalos presentan errores en la estimación de la altura de la vegetación y en las métricas que se pueden extraer a partir de estos productos. La Figura 4B muestra subestimaciones de altura (tonos azules) en zonas de alta cobertura, resultado directo de la sobreestimación del nivel del terreno en el MDT fotogramétrico. En estas situaciones, al no haber claros que permitan estimar el nivel del terreno, el MDT resulta sobreestimado, introduciendo un error en la estimación de la altura de los árboles.

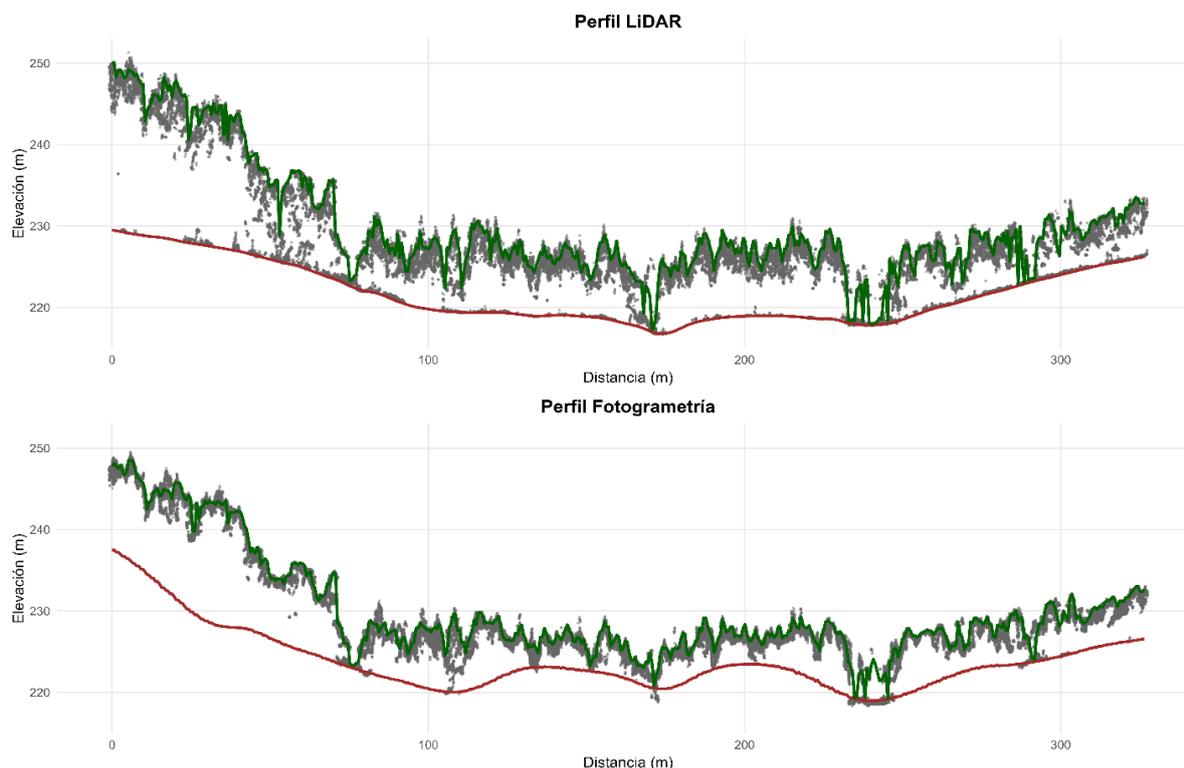


Figura 3. Comparación del perfil de ambas nubes de puntos para un corte transversal en la zona media de la cuenca hídrica.

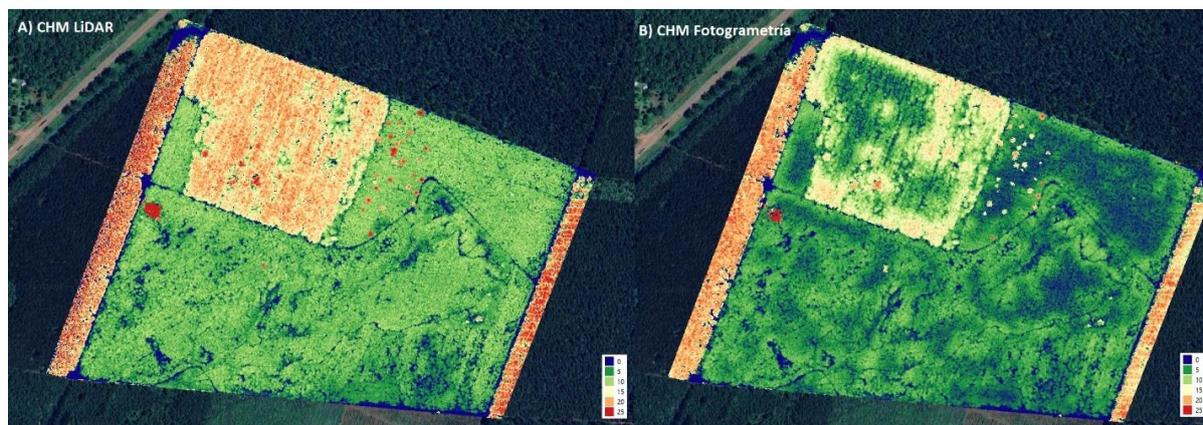


Figura 4. Comparación entre los Modelos de Altura de Copas (CHM) obtenidos por medio de relevamientos LiDAR (A) y con fotogrametría (B).

4. CONCLUSIONES

La comparación directa entre LiDAR aerotransportado y fotogrametría con drones en rodales de *Pinus taeda* reveló diferencias en la capacidad de ambas tecnologías para caracterizar estructuras forestales bajo cobertura densa.

El LiDAR consiguió penetrar el dosel vegetal y caracterizar simultáneamente tanto la estructura tridimensional de la vegetación como el terreno subyacente. La capacidad de registrar múltiples retornos por pulso permitió obtener información del nivel del suelo incluso en las zonas más densas del rodal, generando Modelos Digitales de Terreno que representan la topografía real, incluyendo pendientes, caminos forestales y red hidrológica.

En contraste, la fotogrametría presentó limitaciones severas que comprometen la precisión de productos derivados. La imposibilidad de la cámara para observar el suelo a través del dosel denso



resultó en una sobreestimación del nivel del terreno de 3-5 metros en áreas de alta cobertura, donde el algoritmo de clasificación identificó erróneamente vegetación de estratos intermedios como puntos de terreno. Este error fundamental en el Modelo Digital de Terreno se propagó al proceso de normalización, generando subestimaciones en las alturas de la vegetación y afectando al Modelo de Altura de Copas.

Estas diferencias resultan críticas cuando se requiere información precisa para la toma de decisiones silviculturales. La caracterización exacta del terreno es fundamental para la planificación de drenajes, diseño de caminos forestales, estimación de volúmenes con precisión y zonificación de manejo basada en condiciones de sitio. Del mismo modo, las métricas de estructura vertical derivadas de datos LiDAR confiables constituyen insumos esenciales para el monitoreo del desarrollo de las plantaciones forestales y la estimación de biomasa y productos forestales.

La creciente disponibilidad de sistemas LiDAR montados en drones y la progresiva reducción de costos operativos posicionan esta tecnología como una herramienta cada vez más accesible para la gestión forestal de precisión. Si bien la fotogrametría mantiene ventajas en términos de costo y simplicidad operativa para la generación de ortomosaicos y caracterización del dosel superior, los resultados de esta experiencia muestran que el LiDAR constituye una herramienta más adecuada cuando se requiere la modelación del terreno y la estimación de alturas de vegetación en rodales densos.

5. LITERATURA CITADA

- BAUWENS, S.; BARTHOLOMEUS, H.; CALDERS, K.; LEJEUNE, P. 2016. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests* 7(6):127.
- DALLA CORTE, A.P.; BROADBENT, E.N.; de OLIVEIRA SANTOS, L.H.; et al. 2022. Aplicações do lidar para o inventário florestal – enfoque unidade de área. Atena Editora. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.223222904>
- DUBAYAH, R.; BLAIR, J.B.; GOETZ, S.; FATOYINBO, L.; HANSEN, M.; HEALEY, S.; SILVA, J. 2020. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing* 1:100002.
- HYYPÄ, J.; HYYPÄ, H.; LECKIE, D.; GOUGEON, F.; YU, X.; MALTAMO, M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29(5):1339-1366.
- LIANG, X.; KANKARE, V.; HYYPÄ, J.; WANG, Y.; KUKKO, A.; HAGGRÉN, H.; VASTARANTA, M. 2016. Terrestrial laser scanning in forest inventories. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115:63-77.
- 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061>
- WALLACE, L.; LUCIEER, A.; MALENOVSKÝ, Z.; TURNER, D.; VOPĚNKA, P. 2016. Assessment of forest structure using two UAV techniques: A comparison of airborne laser scanning and structure from motion (SfM) point clouds. *Forests* 7(3):62.
- WULDER, M.A.; WHITE, J.C.; NELSON, R.F.; NÆSSET, E.; ØRKA, H.O.; COOPS, N.C.; GOBAKKEN, T. 2012. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment* 121:196-209.
- 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.



INFORME DE COYUNTURA FORESTO-INDUSTRIAL Y MUEBLERO

Ing. Gustavo CETRÁNGOLO¹; Mg. Fernando COUTO¹

1. Resumen Ejecutivo

Durante el mes de septiembre de 2025, el sector foresto-industrial argentino presentó señales mixtas, con algunos indicios de recuperación en las ventas, aunque en un marco general de estancamiento e incertidumbre. Según los informantes sectoriales, la leve mejora observada se asocia a movimientos precautorios de los distribuidores frente a la volatilidad del dólar previa a las elecciones de medio término. Sin embargo, la demanda interna continúa en niveles bajos y con fuerte competencia de precios.

Las empresas se vieron forzadas a ofrecer descuentos, ampliar plazos de pago y realizar operaciones informales, medidas que impactan negativamente en la rentabilidad y generan tensiones financieras crecientes. El aumento en los cheques rechazados comienza a ser una señal de alerta sobre el deterioro en la cadena de pagos. En este contexto, los segmentos vinculados a pallets mantienen mejor desempeño relativo, mientras que los asociados a la construcción siguen afectados por la retracción de la obra pública y privada. Las exportaciones, aunque de baja rentabilidad, cumplen un rol clave en el sostenimiento de la actividad y el empleo.

Las empresas con integración vertical (forestación propia), procesos de remanufactura y canales de venta directa en los centros urbanos han mostrado mayor capacidad de resistencia. Aun así, el escenario general continúa siendo de alta fragilidad, y la reactivación observada se interpreta más como un rebote técnico tras la caída de 2024 que como un cambio estructural del ciclo.

2. Producción y Actividad Industrial

La producción de madera registró en septiembre un incremento intermensual del 3,47 % y una suba interanual del 11,3 %, según datos del INDEC. Este comportamiento acompaña una leve mejora en los indicadores de la construcción, aunque la actividad aún se mantiene en una 'meseta baja'. Los despachos de cemento alcanzaron 917.161 toneladas, con un aumento del 3,54 % mensual y 0,49 % interanual.

El informe de la Confederación de PYMES Constructoras y el ISAC-INDEC reflejan la persistente debilidad del sector: la actividad cayó 1,8 % mensual en julio y el índice Construya se contrajo 8,6 % en agosto. Los despachos de cemento bajaron 1,5 % mensual, alcanzando el menor nivel para un agosto desde 2012. El empleo formal en la construcción se redujo a 354.305 puestos, 11,4 % por debajo del promedio histórico de la última década, con caídas en NOA, Cuyo, Patagonia y AMBA, y leves subas en la región Centro-Pampeana.

En conjunto, los indicadores productivos del sector maderero y de la construcción sugieren una estabilización de corto plazo sin señales firmes de recuperación estructural.

3. Comercio Exterior y Estrategias Productivas

Las exportaciones de madera aserrada de pino acumularon un incremento del 38,5 % en los primeros nueve meses del año, lideradas por Arauco y Acon Timber, junto con una creciente participación de aserraderos PyME. En septiembre, las exportaciones aumentaron 24,4 % mensual y 63,7 % interanual. El principal destino sigue siendo Asia, aunque los precios internacionales se mantienen deprimidos.

Las exportaciones de molduras continúan estables, con foco en Estados Unidos. Se espera una reactivación de pedidos a partir de enero de 2026, tras la habitual retracción del último trimestre por motivos fiscales en ese país. En el acumulado de los primeros nueve meses, las exportaciones totales

¹ Federación Argentina de la Industria Maderera y Afines (FAIMA)



del sector caen 7,8 % frente a 2024, reflejando la baja de precios internacionales. El mercado observa con expectativa la posible caída de exportaciones brasileñas, que podría derivar en una mayor demanda hacia Argentina.

La estrategia exportadora del sector se centra en mantener niveles mínimos de actividad, reducir costos fijos y asegurar cobranzas, incluso sacrificando márgenes. Las firmas con capacidad exportadora han logrado compensar parcialmente la caída del mercado interno y sostener el empleo.

4. Tendencias del Consumo y Demanda Interna

Los indicadores de confianza del consumidor (UTDT) mostraron en agosto una caída del 13,8 % respecto de julio, con leve estabilización en septiembre. Los sectores de menores ingresos y del interior fueron los más afectados. En paralelo, los permisos de construcción crecieron 1,34 % mensual y 5,04 % interanual en julio, lo que sugiere cierta estabilización de la inversión privada en construcción.

De acuerdo con CAME, las ventas del rubro Madera y Muebles cayeron 2,1 % interanual en agosto y 1,4 % mensual, con una utilización de capacidad instalada del 59,8 %. La falta de financiamiento, el aumento de costos operativos e impositivos, la menor liquidez y el endeudamiento de los consumidores fueron los principales factores que limitaron el consumo. A esto se suma la incertidumbre política y la suba de tasas de interés, que restringen las decisiones de gasto y de inversión.

5. Dinámica del Sector del Mueble

El Índice de Interés del Mueble Argentino Online (IIMAO) registró en septiembre una caída mensual del 23 %, ubicándose en su nivel más bajo desde septiembre de 2021 y 16 % por debajo del valor interanual. Los rubros con mayores descensos fueron colchones (-11 %), muebles (-7,4 %), sillones (-7,25 %) y escritorios (-5 %). Algunas provincias como La Pampa (+26 %), Tierra del Fuego (+24 %) y Formosa (+17 %) mostraron recuperación, mientras que San Juan (-13 %), Neuquén (-12 %) y Buenos Aires (-5 %) registraron caídas.

La producción industrial de muebles y colchones creció 7 % interanual en agosto, aunque con una contracción mensual. Los relevamientos de FAIMA muestran que las PYMES muebleras aún enfrentan una baja promedio del 18 % en ventas en el primer semestre de 2025. La tendencia de mediano plazo sugiere un posible estancamiento productivo luego de un período de alta volatilidad.

6. Conclusiones Generales

El mercado de la madera y el mueble argentino continúa en un escenario de fragilidad estructural, donde la mejora observada en algunos indicadores es aún insuficiente para hablar de recuperación sostenida. La competencia de precios, la falta de liquidez y la caída del poder adquisitivo configuran un panorama desafiante para las PYMES.

Las empresas integradas verticalmente o diversificadas muestran una ventaja comparativa frente al resto del entramado productivo. Las exportaciones, pese a su baja rentabilidad, se consolidan como el principal sostén de empleo y actividad. La construcción, en cambio, sigue siendo el segmento más rezagado del complejo foresto-industrial.

Hacia el cierre de 2025, las perspectivas estarán condicionadas por la estabilidad macroeconómica post-electoral, la evolución del tipo de cambio y el acceso al crédito productivo. La sostenibilidad de la actividad dependerá de la capacidad del sector para mantener niveles de producción, expandir mercados externos y adaptarse a la incipiente transición hacia una economía más previsible y orientada a la inversión productiva.



DINÁMICA DE INDICADORES ECONÓMICOS Y PRODUCTIVOS DE LA ACTIVIDAD FORESTAL DEL NORESTE DE ENTRE RÍOS

Mario FLORES PALENZONA¹; Carlos DE LA PEÑA²; Matías MARTINEZ²; Luis VERA³; Ciro MASTRANDREA²

1. INTRODUCCIÓN

La actividad foresto-industrial constituye una de las principales actividades productivas de la provincia de Entre Ríos, siendo la tercera provincia con mayor superficie forestada y la segunda en la producción de salicáceas y eucaliptos a nivel nacional. La actividad concentrada en los departamentos del noreste: Concordia, Colón y Federación, aporta el 3 % del Producto Bruto Interno (PBI) primario y el 14 % del PBI industrial de la provincia (Portal de Parques Industriales de Entre Ríos 2025).

En esta región, las plantaciones comerciales comenzaron en los inicios de la década del 50, con eucaliptos, para ser utilizados en la elaboración de cajones y envases para la actividad citrícola, y pinos con destino celulósico (de la Peña, 2016). En la actualidad, se alcanza una superficie total de 114.284 ha en los tres departamentos, donde un 93 % son especies del género *Eucalyptus*, y un 7 % del género *Pinus*. (Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, junio 2025).

Esta superficie forestal, permitió el desarrollo de una infraestructura industrial, que actualmente alcanza los 149 aserraderos activos en los tres departamentos de la región noreste de Entre Ríos (Mastrandrea, Flores, Martínez, 2025 inédito). Este complejo foresto-industrial, está orientado a la elaboración de productos de eucalipto destinados a la construcción y el mercado interno.

Dada la relevancia económica y productiva de la actividad en esta región, el objetivo general del presente trabajo es analizar la dinámica y el comportamiento de los principales indicadores productivos y económicos de la actividad en los últimos 10 años (2015-2025), Además, se propone un análisis en mayor detalle del comportamiento de alguno de éstos (considerados más relevantes) para el período postpandemia (2021-2025).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para el análisis de la evolución y dinámica de precios de los productos identificados como indicadores productivos, se utilizaron los precios modales del relevamiento de precios de la Planilla de Precios Forestales del noreste de Entre Ríos del período de análisis (2015-2025). Con esta información se realizó la actualización de la Base de Datos de precios forestales (Vera y Lauria, 2007), que permitió la construcción de los gráficos correspondiente para los siguientes productos:

- Madera para aserradero Eucalipto (+ 18 cm en punta fina), monte en pie (t).
- Tabla verde aserrada de Eucalipto de 1" (tabla estándar) (P²).
- Machimbre de Eucalipto 1/2", selecto/clear (m²).
- Vigas multilaminada eucalipto 2" (P²).
- Flete de madera rolliza (medio 30 km) verde (t).
- Elaboración y carga (t)
- Costos de implantación (ha)

¹ Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial. SAGyP-MEP.

² Dpto. Forestal. EEA INTA Concordia.

³ Socioeconomía. EEA INTA Concordia.



Con la información recolectada, en primer lugar, se procedió a analizar la variación de los precios nominales de los productos forestales en el período 2021-2025. Para el análisis se calcularon dos tipos de incrementos:

Variación Total del Periodo: La variación de precios de los productos forestales a lo largo de todo el periodo de estudio (noviembre 2021 a julio 2025).

Incremento Inter-Publicación: La variación de precios entre cada publicación sucesiva, teniendo en cuenta los mismos precios de partida del punto anterior.

Para contextualizar los resultados, se efectuó una comparación de los incrementos de precios forestales con la evolución del Índice de Precios Internos al por Mayor (IPIM) y el Índice de precios al consumidor (IPC) correspondientes al mismo periodo. Esta comparación permitió determinar si el aumento de los precios forestales estuvo en línea con la inflación mayorista y minorista de la economía general.

Finalmente, para determinar la evolución del poder adquisitivo de los precios, se realizó una conversión de los precios a valores en dólares estadounidenses MEP (USD) por unidad métrica de cada producto. Esto facilitó la comprensión de la tendencia real de los precios, independientemente de la devaluación de la moneda local.

Para el análisis de la evolución de indicadores productivos cuantitativos como la superficie forestal y la cantidad de aserraderos para los tres departamentos, se actualizó la serie histórica publicada en 2018 (de la Peña y Flores, 2018).

Por último, se realizó la actualización hasta el año 2025 de la estructura de costos de implantación publicada periódicamente por el INTA Concordia, y propuesta en el trabajo de Vera y Larocca (2005). A partir de la misma, se realizó el cálculo de la TIR (tasa interna de retorno) de todo el período de estudio, para utilizarlo como indicador de la dinámica de la rentabilidad de las plantaciones forestales para un sitio de IMA 35, bajo un esquema de manejo tradicional.

Adicionalmente, se obtuvo por consulta a la página web del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) las bases de datos digitales de los indicadores económicos clave: el Índice de Precios Internos al por Mayor IPIM y el IPC para poder estimar los precios a valores constantes, que permiten comparar el valor de bienes y servicios a lo largo del tiempo, eliminando el efecto de la inflación. También, se utilizó el índice de la actividad de la construcción (ISAC), como parámetro de comparación del nivel de actividad de la industria forestal local, ya que no existe un indicador regional específico para este rubro.

3. RESULTADOS

3.1. Variación de precios en productos forestales para la región de Entre Ríos (2021-2025)

El Gráfico 1 presenta la evolución del precio de la materia prima de Eucalipto (monte en pie-+18 cm diámetro pf - MP) a lo largo del periodo 2021 - 2025. Se analizan dos métricas; el valor expresado en dólares (dólar MEP) por tonelada (U\$\$/t) y el precio en pesos argentinos por toneladas (\$/t).

El valor de la materia prima en pesos argentinos mostró una tendencia ascendente continua y acelerada hasta finales de 2023 - comienzos de 2024 (máxima pendiente) por efecto de la inflación y la variación en el tipo de cambio. De mediados de 2024 a la fecha el valor se mantuvo relativamente estable en pesos y a la baja en dólares en un contexto de retracción de la demanda.

Cabe destacar que durante el año 2023 el peso argentino presentó 2 devaluaciones una en agosto de aproximadamente el 22 % y una más fuerte durante diciembre del mismo año de aproximadamente un 54 %. A lo largo del 2023 el peso argentino sufrió una devaluación del 78 %.

La curva en U\$\$/t muestra una tendencia general al alza, con un primer periodo (noviembre 2021 a diciembre 2023) en donde la tendencia es decreciente, aunque con cierta estabilidad. A comienzos de 2024 como resultado de un incremento abrupto alcanza el máximo valor del período, que es proseguido por otro período con tendencia decreciente y ciertas oscilaciones. Para todo el periodo el precio promedio en dólares fue de 17,85 U\$\$/t, con un máximo de 24,47 (abril 2024) y un mínimo de 13,59 (diciembre de 2023).

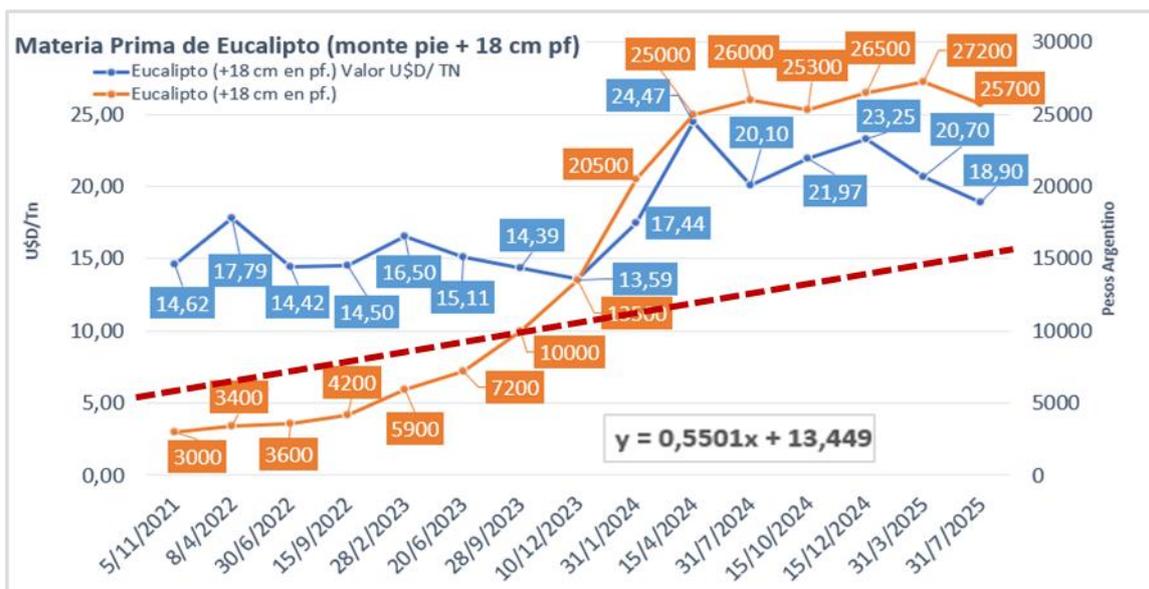


Gráfico 1. Evolución del precio de la materia prima de Eucalipto (monte en pie + 18 cm diámetro pf) a lo largo del periodo evaluado (noviembre 2021 – julio 2025)

En el Gráfico 2, se presenta la evolución del precio de la tabla verde de Eucalipto de 1/2 pulgada de espesor por P², expresado en moneda local y dólar MEP, para el periodo comprendido entre noviembre 2021 hasta julio 2025.

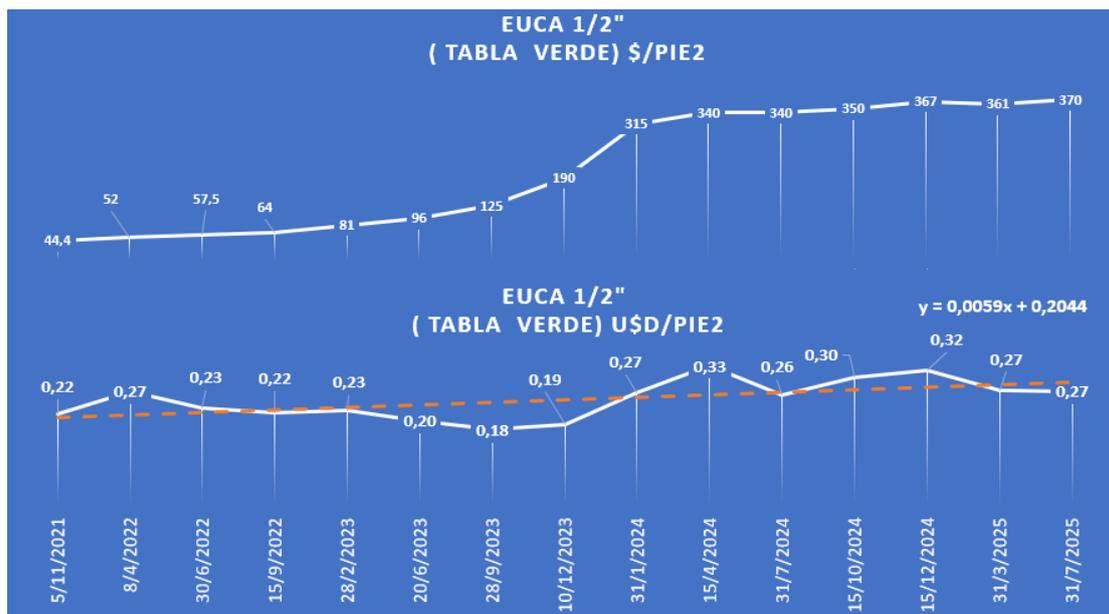


Gráfico 2. Precio de tabla verde de Eucalipto (1" de espesor), en pesos y dólar MEP (Nov 2021 – Jul 2025).

En moneda local la tabla verde incrementó su precio en 325,6 \$/P² desde noviembre 2021 hasta julio 2025. El mayor incremento se observa de diciembre 2023 a enero 2024, pasando de 190 \$/P² a 315 \$/P², un incremento de 66 % respecto al precio de diciembre 2023.

En análisis de dólar MEP, el precio se mantiene relativamente estable para el periodo analizado, promediando los 0,25 dólares por pie, con un máximo de 0,33 y un mínimo de 0,18.

El Gráfico 3, representa la evolución del precio del machimbre de Eucalipto (1/2" de espesor) en pesos argentino (\$) y dólar estadounidense (U\$D MEP), abarcando el periodo desde noviembre 2021 hasta julio 2025.

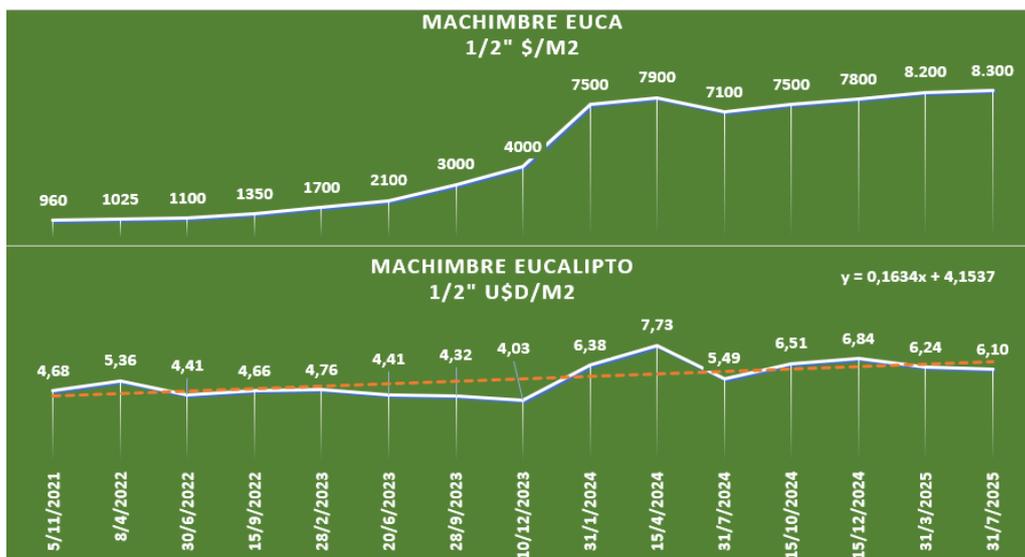


Gráfico 3. Evolución del precio de machimbre de Eucalipto (1/2" de espesor), en moneda local (\$) y dólar (U\$\$-MEP), periodo noviembre 2021 a julio 2025.

En moneda local se observa una tendencia creciente para todo el periodo, con su máximo incremento (3900 \$/m²) en el periodo diciembre 2023 a abril 2024 y una única leve caída entre abril y julio 2024.

En dólares se registra un primer periodo, noviembre 2021 a diciembre de 2023, donde la tendencia es estable o levemente decreciente, sucedido por un pico de aumento registrado entre diciembre 2023 y abril 2024 alcanzando el máximo valor de la serie (7,73 U\$\$/m²). A dicho pico lo sucede una baja y luego un período de estabilización del precio llegando a julio 2025 con un precio 6,10 U\$\$/m². El precio promedio para este periodo fue de 5,46 dólares, con un máximo de 7,73 y un mínimo de 4,03.

En el Gráfico 4 se observa la evolución de los precios de la viga multilaminada de Eucalipto de 2", valoradas en dos tipos de moneda, pesos argentinos y dólar (MEP), para el periodo de noviembre 2021 hasta julio 2025, observándose tendencia creciente en ambas monedas.

Los precios en pesos de viga multilaminada tuvieron un incremento sostenido de noviembre 2021 hasta diciembre 2023 de 455 %. En el periodo diciembre 2023 a enero 2024, el incremento fue de 150 % del precio. El máximo precio alcanzado para el periodo evaluado se registró en diciembre 2024 (1900 \$/P²). Luego de este máximo, se observa una disminución del 9 % hasta julio 2025.

Por otro lado, los precios en dólares de la viga multilaminada fluctuaron entre 1,07 a 1,31 dólares para el periodo noviembre 2021 a diciembre 2023. A partir de enero 2024 hasta julio 2025 hubo una oscilación de los precios, con incremento y descensos, finalizando con valores prácticamente iguales a los del inicio. La tendencia general del periodo analizado fue al alza, el promedio fue de 1,22 U\$\$/P², con un máximo de 1,67 U\$\$/P² (diciembre 2024) y un mínimo de 0,94 U\$\$/P² (septiembre 2023).

El Gráfico 5, muestra la evolución de los precios para el flete de rollizos (distancia 30 km) en valores de pesos argentinos y dólar (dólar MEP/bolsa) para el periodo noviembre 2021 hasta julio de 2025.

El flete de rollizo en pesos presentó un crecimiento constante en sus valores. Para todo el periodo se observa un incremento de 340 %, representando en 1270 \$/t de aumento.

En dólares la tendencia general es al alza, pero con una depresión clara entre mediados de 2023 y comienzos de 2024. El precio promedio para este periodo fue de 3,24 U\$D/t, registrando un máximo de 4,82 (diciembre 2024) y un mínimo de 1,81 U\$D/t (diciembre 2023)

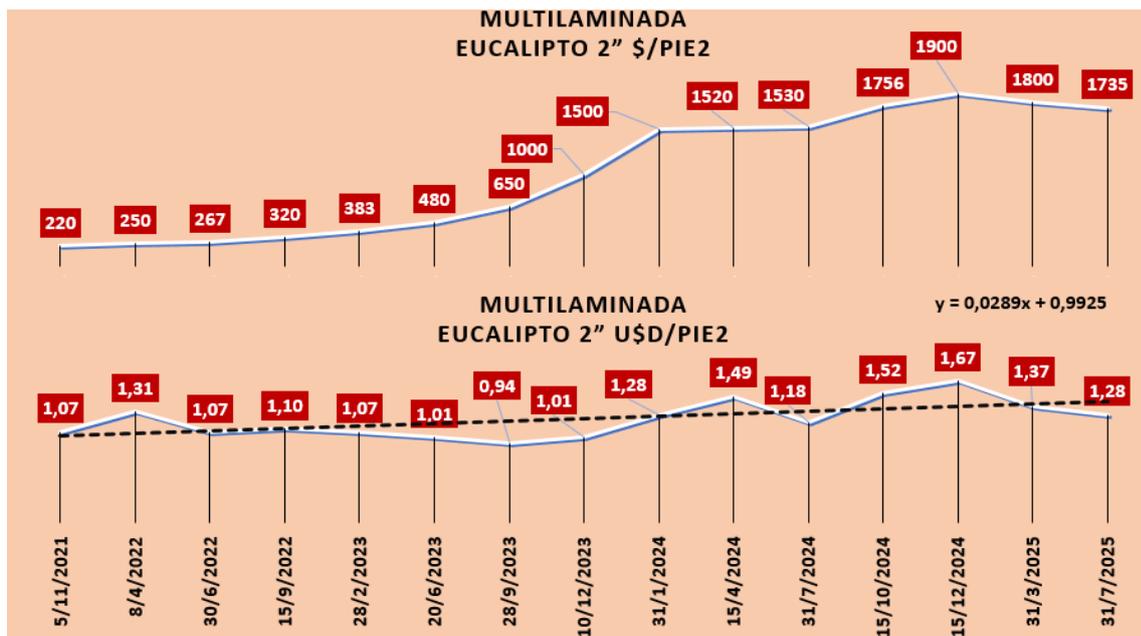


Gráfico 4. Dinámica de precio de vigas multilaminadas Eucalipto (2''), en pesos argentinos y dólares (dólar MEP/bolsa), periodo noviembre 2021 – diciembre 2025.

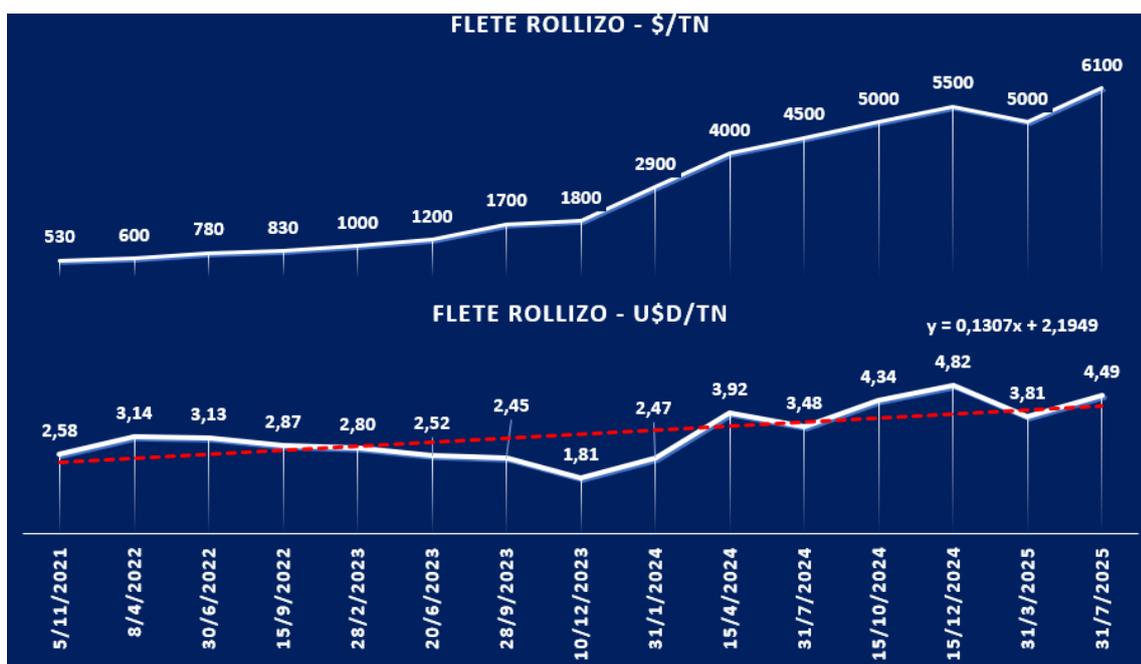


Gráfico 5. Evolución del precio del servicio flete de rollizos (distancia 30 km), en moneda local (\$) y dola (U\$\$-MEP), periodo noviembre 2021 a julio 2025.

En el Cuadro 1 se presenta el índice de inflación tanto de productos internos mayorista (IPI) e índice de precio del consumidor (IPC) y las variaciones de precios de 4 productos forestales y un 1 servicio.

En el cuadro se observa una alta variación de los precios y de los índices, destacándose los mayores valores de inflación en el periodo 2022-2023. Los incrementos de los precios de productos forestales resultan menores que los de los indicadores en la mayor parte del periodo evaluado. Existe una recuperación de los precios en el 2024 mayormente superando al IPI, y en el caso del IPC se vio superada solamente por el precio de flete. Para el 2025, los incrementos de precios vuelven a ser inferiores con respecto a los índices macroeconómicos y en algunos casos hasta negativos.



Cuadro 1. Variación acumulada anual de los precios de productos forestales con los indicadores macroeconómicos de Argentina: Índice de Precios Internos al por Mayor (IPIM); Índice de Precios al Consumidor (IPC), periodo 2022-2025.

	IPIM ACUM %	IPC ACUM %	Variación Ac. Rollos %	Variación Ac. Tabla verde 1" %	Variación Ac. machimbre 1/2" %	Variación Ac. Flete Rollos %	Variación Ac. Multilaminadas %
2022	84	94	40	44	41	57	45
2023	276	211	221	197	196	117	213
2024	67	117	96	93	95	206	9
2025	12	16	-3	1	6	11	-9
Total	1239	1428,6	754,4	733,3	764,6	1050,9	683,5

A lo largo de estos 4 años evaluados, se observa que en la mayor parte los incrementos de precios de los productos estuvieron por debajo de los incrementos de los indicadores. Los productos que sufrieron mayor desvalorización fueron la tabla verde con -506 % y -695 % y las vigas multilaminadas con -555 % y -745,2 %, con relación a los índices IPIM e IPC respectivamente. Los precios de los rollizos en pie y del machimbre (1/2") acompañaron en mayor grado los incrementos de los indicadores. Por su parte, el costo del flete fue el que acompañó en mayor medida los incrementos de los indicadores, teniendo una incidencia negativa en el costo final de la mayoría de los productos.

3.2. Variación a precios constantes de productos forestales para la región de Entre Ríos en moneda constante (09/2025) (Serie completa)

La presentación de la serie completa de precios y costos vinculados a la actividad foresto industrial permite observar de manera más clara y en retrospectiva ciertas tendencias/cambios/transformaciones que han ocurrido en el devenir de dicha actividad/sector a lo largo de los años. A efectos de poder visualizar los mismos se presentan a valor constante el precio de algunos productos primarios, industriales e incluso servicios ligados a la actividad en la región.

En el Gráfico 6 se presenta una serie de largo plazo que incluye la evolución de los precios de la madera de eucalipto en pie (MEP tn), y la tabla estándar verde de 1" (P²).

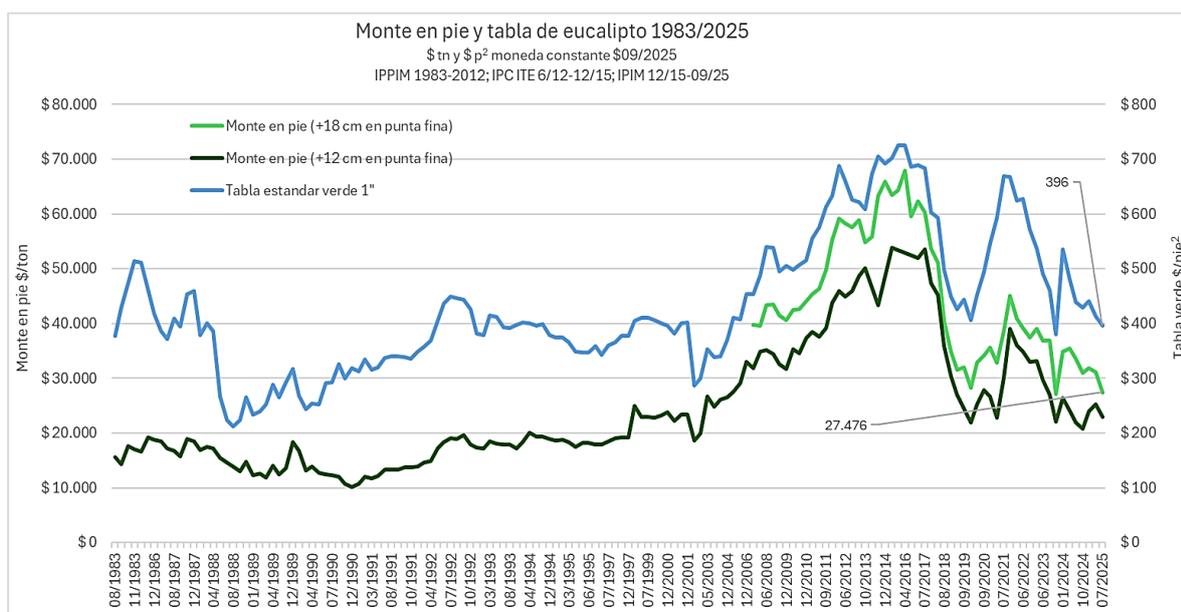


Gráfico 6. Precios a moneda constante de monte en pie (MEP) de eucalipto para las categorías + 12 cm pf y + 18 cm pf (\$/tn) y tabla estándar verde (\$/ P²) para el período 1983-2025.



Adicionalmente en el Gráfico 7 se presenta una serie de precios para una ventana temporal menor o de mediano plazo (2003-2025) que incluye las mismas variables del gráfico anterior.

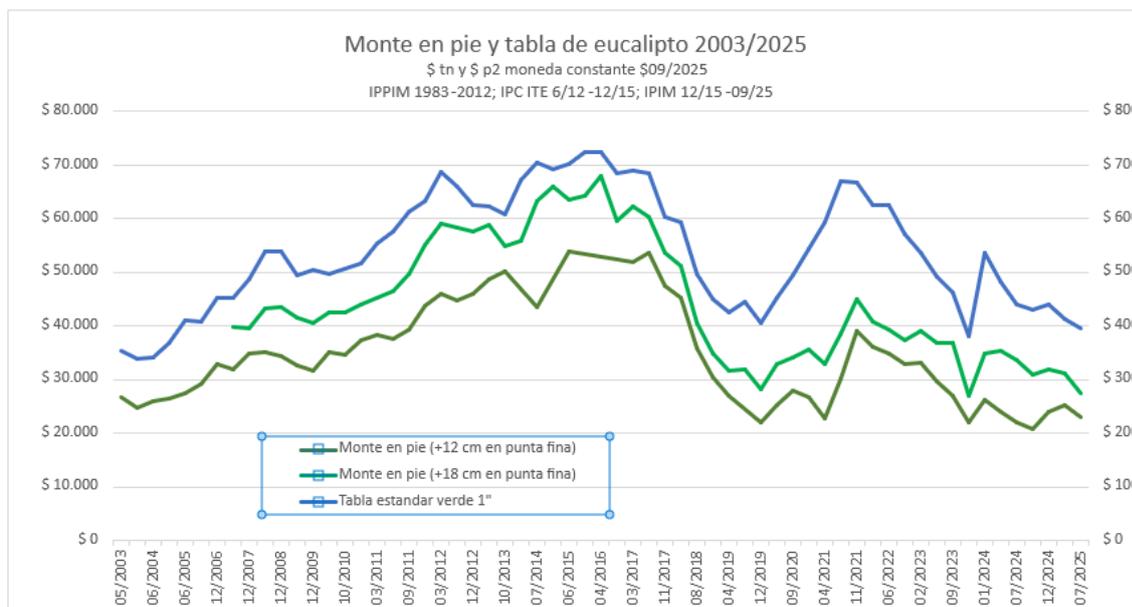


Gráfico 7. Precios a moneda constante de monte en pie (MEP) de eucalipto para las categorías + 12 cm pf y + 18 cm pf (\$/tn) y tabla estándar verde (\$/ P²) para el período 2003-2025.

En el siguiente gráfico se observan los precios a moneda constante de algunos productos de valor agregado como el machimbre de Eucalipto 1/2", selecto/clear (\$m²) y las vigas multilaminadas de eucalipto 2" (\$/P²), respecto de las tablas verde y seca (\$/P²) en una ventana temporal media (2010-2025).

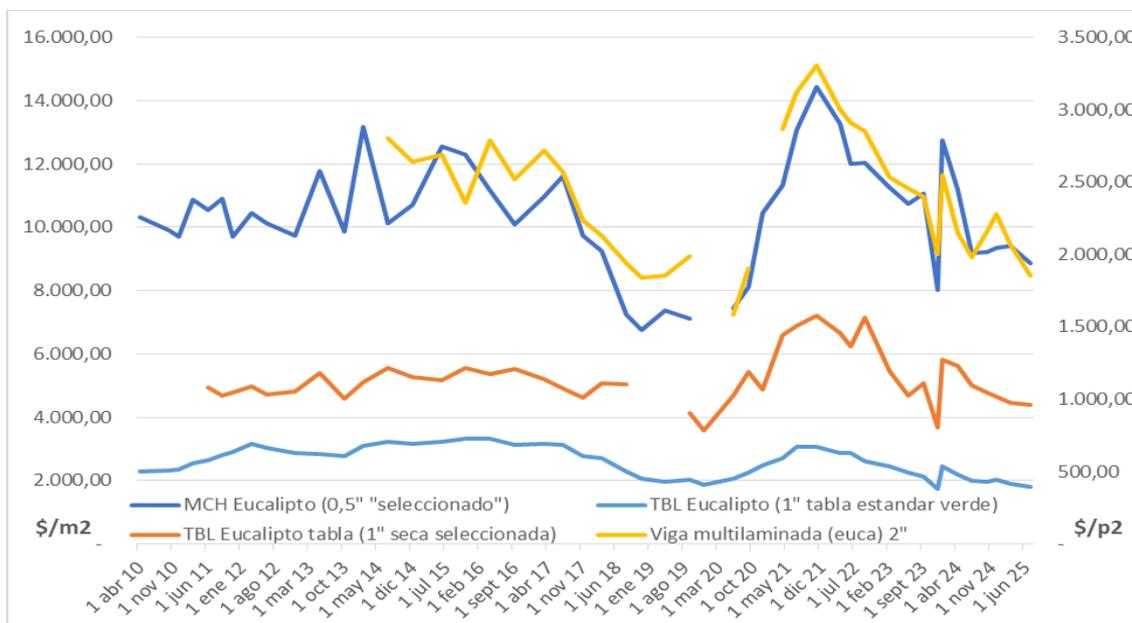


Gráfico 8. Precios a moneda constante de productos de primera transformación y valor agregado foresto industriales.

Finalmente, en el Gráfico 9 se puede observar el comportamiento de los precios a moneda constante de servicios relevantes para la actividad como la elaboración y carga (\$/tn) y el flete corto (30 km) de madera rolliza (\$/tn)

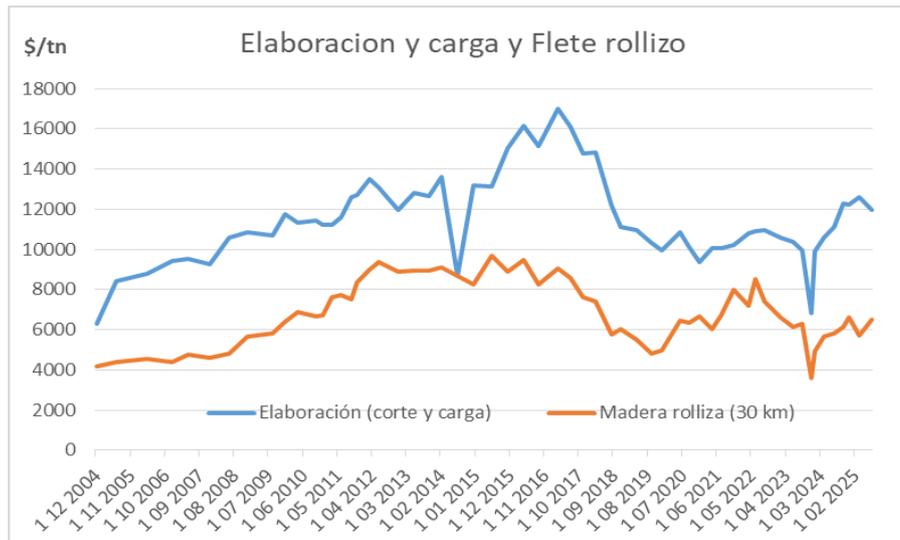


Gráfico 9. Precios a moneda constante de servicios de elaboración y carga y transporte de rollos.

En el análisis de mediano plazo a moneda constante se puede observar que los precios máximos de los productos primarios e industriales se registran hacia fines de 2021 – comienzos de 2022, mientras que los precios actuales son comparables e incluso en algunos casos inferiores a los observados al inicio de la serie (2010). En lo que respecta a servicios los valores actuales se encuentran por encima de los valores registrados al inicio de la serie, con máximos entre 2016-2017.

3.3. Variación a precios constantes de costos de implantación y rentabilidad de la actividad para la región de Entre Ríos

Los costos de implantación con el modelo utilizado muestran en la actualidad valores nominales que resultan elevados respecto de los obtenidos con otras metodologías/estructuras de cálculo, tanto en pesos (\$) como en dólares (u\$s). De todas formas y a efectos de poder comparar costos obtenidos con una misma metodología a lo largo del tiempo se presentan a valor constante en el gráfico 10.

En dicho gráfico se observa como los costos nominales y a valor constante en pesos crecen exponencialmente a partir de fines del año 2023, mientras que la curva de costos en dólares muestra un comportamiento similar a la de costos en pesos a valor constante a lo largo de toda la serie (10 años).

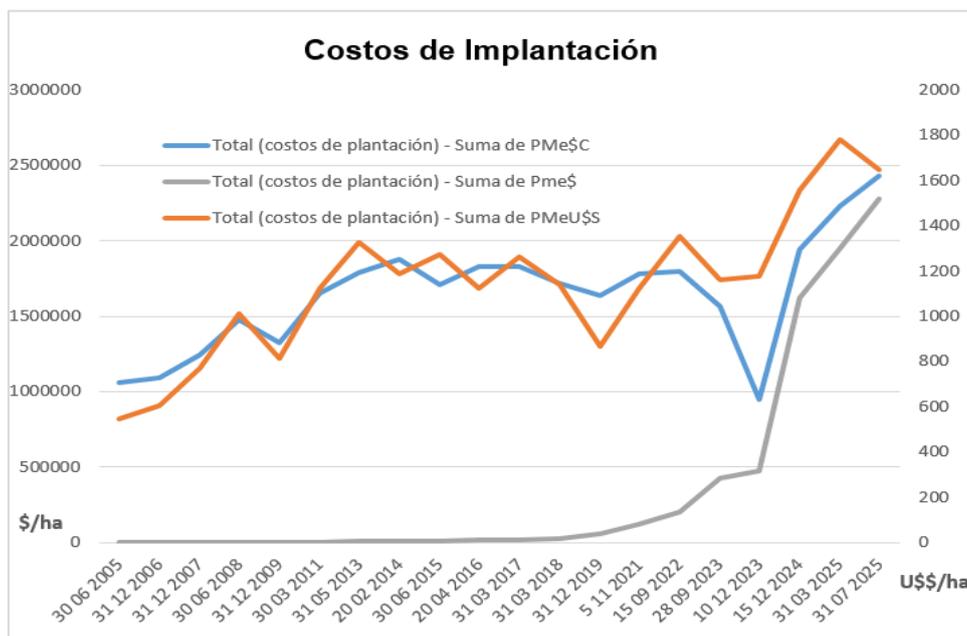


Gráfico 10. Costos de plantación a moneda constante para eucalipto en el noreste de Entre Ríos.



Para el mismo período la rentabilidad de la actividad primaria, considerando el mismo modelo de producción tradicional desarrollado por INTA Concordia para el cálculo de los costos, la rentabilidad de la actividad primaria viene sufriendo una fuerte y progresiva caída.

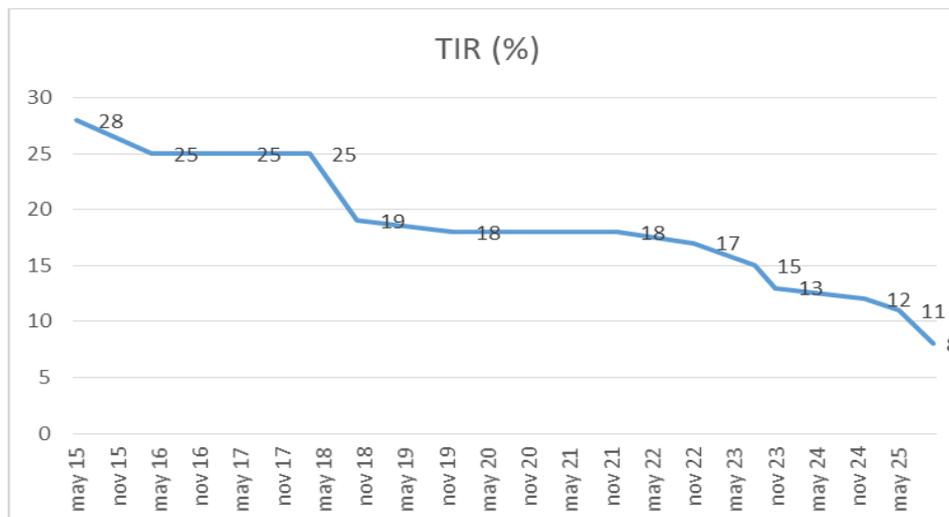


Gráfico 11. Tasa interna de retorno (TIR) para el negocio forestal en la región.

3.4. Evolución de la superficie forestal y de la industria forestal en el noreste de Entre Ríos

A partir de la actualización de la superficie con plantaciones de eucaliptos y pinos para los tres departamentos (Concordia, Colón y Federación), se observa una disminución de la tasa de plantación en los últimos 10 años. En el caso de la superficie con plantaciones del género *Pinus* sp. se observa una disminución de la superficie plantada total.

Para el caso de la cantidad de aserraderos en actividad para los tres departamentos, se observan en el último decenio una continua disminución del número de aserraderos activos, aunque a una tasa menor que la observada en el período anterior (2009-2016).

4. CONCLUSIONES

Durante el período de análisis, los principales indicadores muestran un estancamiento en términos de expansión productiva y resultado económico de la actividad foresto industrial en la región, que se ve reflejado con claridad en la evolución de superficie con plantaciones forestales y el número de aserraderos activos (Gráfico 11).

Esto puede explicarse en parte, a que la actividad forestal en esta región se ha especializado en la elaboración de productos destinados a la construcción y al mercado interno. Por lo tanto, al analizar la dinámica del Índice sintético de la construcción (ISAC) en relación con el precio constante del principal producto comercial, la tabla verde de eucalipto, se observa una fuerte correlación positiva en el comportamiento de ambas variables (Gráfico 12).

En la última década factores como el aumento de los costos tanto a nivel primario como industrial han presionado sobre los márgenes de rentabilidad de cada uno de estos eslabones, lo cual sumando a bajos niveles de demanda (a excepción de la última parte de la pandemia) hacen menos eficiente y competitiva a la actividad.

En lo que respecta al análisis de precios nominales en pesos de los productos seleccionados, es claro el incremento abrupto ocurrido entre diciembre de 2023 y abril del 2024, con posterior tendencia a una leve baja o estabilización en valores superiores a los observados en el periodo de noviembre 2021 a diciembre 2023. Dicho incremento se explica por los niveles de inflación y la fuerte variación ocurrida en el tipo de cambio (\$/U\$s) hacia fines del año 2023.

En el análisis de mediano plazo con valores a moneda constante se observa que los precios máximos de los productos analizados no se corresponden temporalmente con lo observado cuando se analizan



precios nominales tanto en pesos como en dólares. En el caso de los precios a moneda constante se registran máximos entre mediados de 2021 y 2022, siendo los actuales uno de los niveles más bajos observados a lo largo del período analizado (2010-2025).

Por último, se considera importante dejar algunas reflexiones que surgen de la información analizada. Por un lado, se vislumbra una situación compleja para el sector, por la baja demanda ligada a la construcción, y la imposibilidad de acceso a un mercado de exportación en el corto plazo que pueda traccionar la cadena. Esta situación, se complejiza si se contempla la necesidad de reconversión de la industria en el corto plazo para cumplir los requisitos de calidad y producción que requieren los mercados externos, que necesariamente van de la mano de una fuerte inversión de capital.

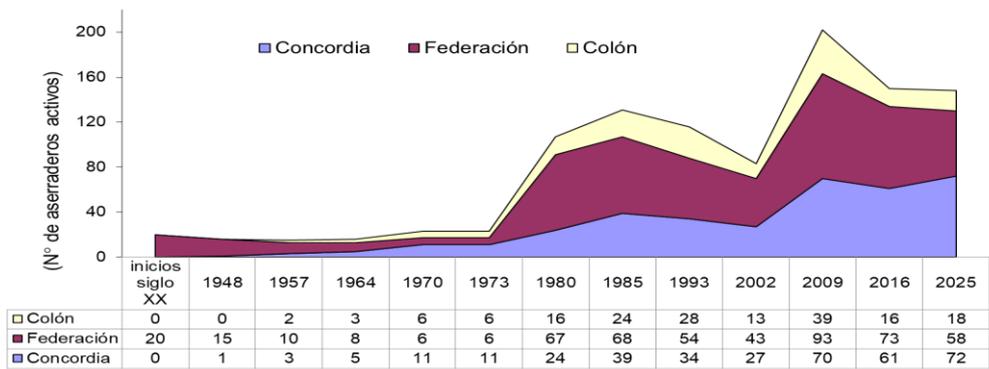
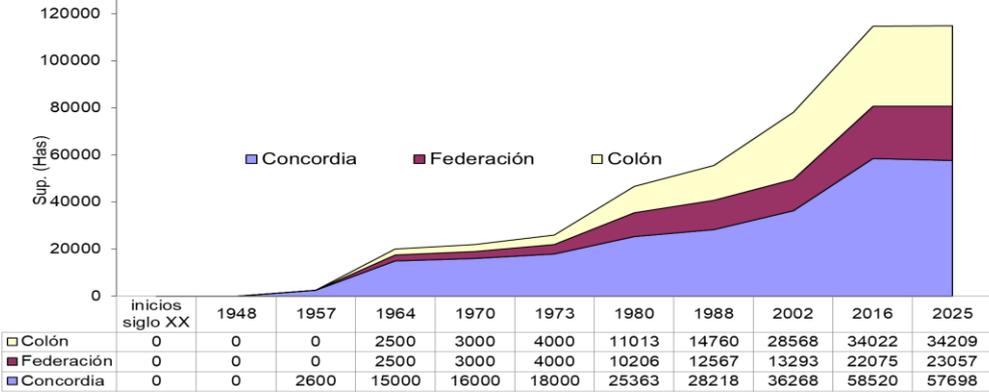
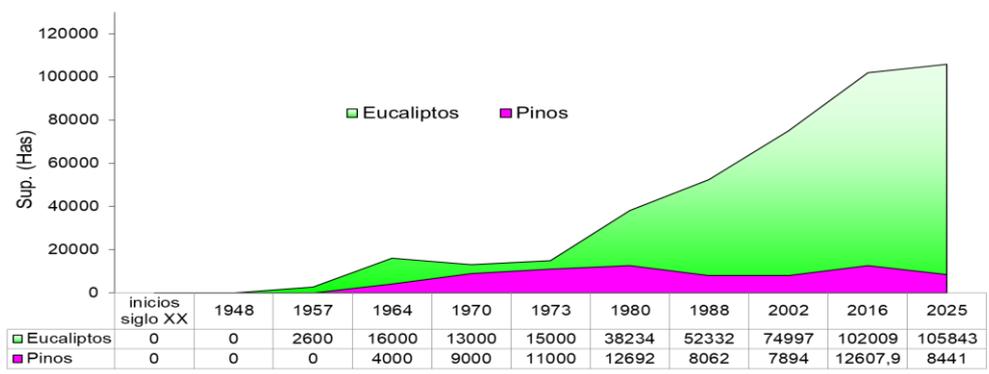


Gráfico 11. Evolución de la superficie forestal por especie (a) y por departamento (b); evolución número de aserraderos por departamento (c).

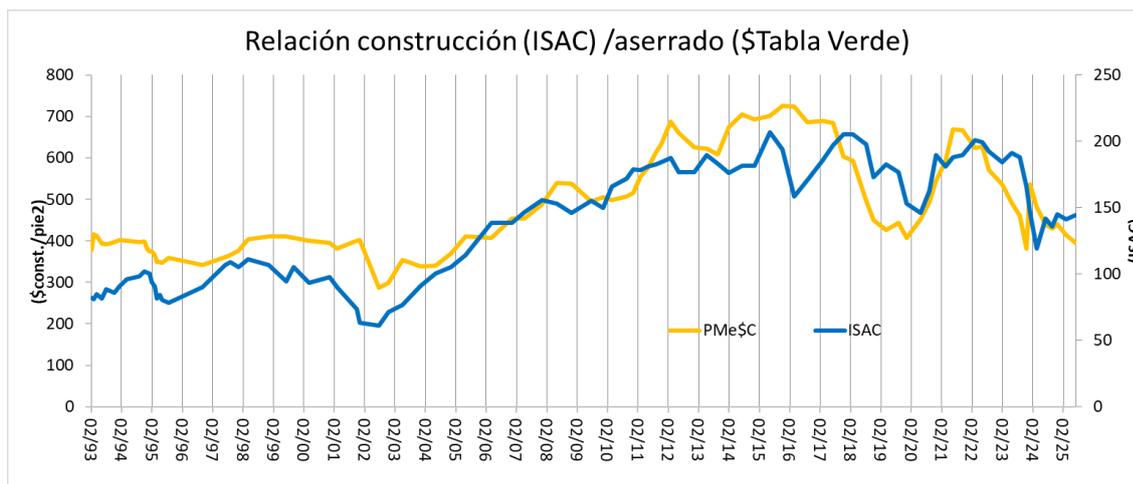


Gráfico 11. Relación índice sintético de la construcción (ISAC) con precio de la tabla verde a valores constantes en pesos.

5. BIBLIOGRAFÍA

DE LA PEÑA, C. 2016. "Entre naranjas, jangadas y eucaliptos. Trayectoria y dinámica Socio-técnica de la actividad forestal en el Noreste de la provincia de Entre Ríos, desde los inicios hasta comienzos del siglo XXI". Tesis de Maestría, Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. <https://doi.org/10.35537/10915/61776>

VERA, L.; LARROCCA, F. 2005. Comparación económica de alternativas de manejo de forestaciones de Eucalipto: con y sin podas. Actas XX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Actas XX Jornadas Forestales de Entre Ríos. Octubre de 2005.

VERA, L.; LAURIA, J.; SANCHEZ ACOSTA, M. 2007. Serie de precios de la cadena del Eucalipto en el noreste de Entre Ríos. Actas XXII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Octubre de 2007.

Portal de Parques Industriales – Gobierno de Entre Ríos. <https://parquesindustriales.entrerios.gov.ar/industria>
Tablero de Plantaciones Forestales - Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial-SAGyP-MEC. <https://www.magyp.gob.ar/desarrollo-foresto-industrial/cadena-valor.php>.



CONSTRUYENDO INDUSTRIA EN ARGENTINA. DEL PROYECTO AL CRECIMIENTO SOSTENIDO

Agustín KICZKA¹; Raúl ROTZEN

El proyecto Acon surge de la mano de HS Timber, que es una empresa con sede en Viena, Austria.

HS tiene varios aserraderos en Europa. Puntualmente en Rumania, Alemania Finlandia y acaban de adquirir 2 en Letonia y otro en Suecia. Acon Timber es su primer proyecto fuera del continente.

El grupo tiene capacidad de producir 3,65M de m³ de tablas; 768K toneladas de pellets; 364K m³ de columnas y vigas; 170K m³ en paneles; Emplea a ~3.000 personas; Y produce 45 Mw de energía de fuentes renovables, suficientes para abastecer a 105K hogares.

La exportación de sus productos alcanza a más de 80 países. 5 % África, 27 % Europa, 54 % Asia y Oceanía y un 14 % en América.

Más del 80 % de la producción son tablas rústicas y cepilladas. Y la otra parte se compone de paneles, postes, vigas y machimbre.

Todos los aserraderos de HS, incluido Acon están certificados con PEFC y la planta de paneles de Rumania y el aserradero de Finlandia tienen certificación FSC.

Su visión era expandir las operaciones hacia Sudamérica, diversificando la oferta de productos, con el objetivo de llegar a nuevos mercados y clientes ofreciendo un producto diferente.

Para concretar esta inversión en Argentina, HS formó un *joint venture* con Forestcape, de capitales belgas, que ya contaba con inversiones forestales en la zona de Virasoro, Corrientes. Y fue fundamental para posibilitar el desembarco.

Cadena de Valor de Acon

El aserradero de Virasoro representa un proyecto de inversión innovador y único en el país. Nuestro modelo productivo combina tecnologías avanzadas y procesos altamente eficientes, diseñados para minimizar el impacto ambiental y fomentar el desarrollo sostenible de las comunidades en las que operamos. La madera utilizada proviene de bosques implantados de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda*, lo que refleja nuestro firme compromiso con las personas y con el planeta.

La cadena productiva de ACON se basa en el principio de “cero desperdicios”, aprovechando al máximo cada componente de la materia prima. Este enfoque no solo asegura la máxima eficiencia y rentabilidad, sino que también nos permite desempeñar un rol activo en la mitigación del impacto social y ambiental.

Procesamos los rollos para obtener madera aserrada de calidad y, al mismo tiempo, transformamos los subproductos (cortezas, despunte, astillas y virutas) en pellets. La corteza y parte del chip se utiliza como combustible para nuestras calderas de vapor, mientras que implementamos estrategias de gestión eficiente del agua y de los residuos para reducir el consumo y el desperdicio.

Del movimiento de suelo al primer rollo

Acon Timber es una inversión de 135M de dólares, abriendo potencial de inversiones para más de 200M adicionales. Es la inversión más alta en los últimos 20 años en la foresto industria. Es una industria sostenible que genera más 340 puestos de trabajo directos y más del doble en indirectos en Virasoro y alrededores.

¹ Acon Timber S.A.U. Edificio República, Tucumán 1, Piso 1, Oficina 30, C1049AAB, CABA (Buenos Aires).
office@acontimber.com www.acontimber.com



Durante el 2021 se realizó el desarrollo de ingeniería en base un concepto productivo basado en los otros aserraderos del grupo. El movimiento de suelo comenzó en enero de 2022, y en noviembre de 2023 se realizó el primer corte de rollo. Solo unos meses después, en febrero de 2024, se exportó el primer contenedor, marcando el inicio de la etapa operativa del proyecto.

El montaje del aserradero implicó una compleja logística nacional e internacional: la importación de 450 contenedores y la coordinación de decenas de técnicos provenientes de distintos países. Participaron empresas tecnológicas líderes como Mahild (Alemania), Linck (Austria), Planalto (Brasil), Microtec (Italia), Salmatec (Alemania), Springer (Austria), Gilbert (Canadá), Valon Kone (Finlandia), Rudnick and Enners (Alemania), Stela (Alemania), Prado (España), entre otras.

Desafíos del montaje

- Importar los equipos. Entre 3 y 6 meses de demora por las CIRA.
- Falta de productos a nivel local que extendieron el cronograma de la obra. Ejemplo cables eléctrico, Access Points de internet.
- Barreras idiomáticas y diferencias culturales.
- La falta de experiencia en la mano de obra local. Simplemente porque se trajo una tecnología muy avanzada y la lejanía de la propia planta.

Del montaje a la operación

Pasar de lo proyectado a la operación fue un proceso vertiginoso y desafiante. La capacidad de adaptación y la dinámica en la toma de decisiones fueron claves para sostener el ritmo de crecimiento, la comunicación intercultural representó uno de los principales desafíos.

Una de las acciones fue enviar a varias personas se instalaron en Europa para trabajar en los aserraderos de allá, adquiriendo experticia con esta tecnología. Ya que resulta difícil encontrar en el mercado laboral local, gente que ya haya entrado en contacto con estándares de calidad y tecnología tan altos como los de Acon.

Otra, fue la de incorporar a los líderes de los distintos sectores en los procesos de montaje. Con el fin de que se familiaricen con los equipos. Aunque esto, también tiene una contraparte negativa, ya que genera bastante desgaste.

Etapas del proyecto

Acon fue concebido como un proyecto en etapas.

- Primera etapa: montaje, capacitación y puesta en marcha, alcanzando un volumen de 900.000 toneladas de rollos procesadas por año.
- Segunda etapa: una vez estabilizada la producción, duplicar la capacidad productiva sumando algunas líneas en clasificación, planer, caldera.

El siguiente paso será sumar valor agregado al producto final, posiblemente con una planta de *finger joint*, tableros, actualmente eso en fase de análisis.

¿Por qué Argentina y por qué Virasoro?

La elección de Argentina, y particularmente de Virasoro, responde a una combinación de factores estratégicos:

- Disponibilidad de bosques maduros dentro de un radio de 150 km de la planta, con condiciones edafoclimáticas óptimas para el crecimiento del pino. En Argentina tenemos 1,3M de has de plantaciones maduras y 3,7M de has disponibles para plantación. (Fuente AFoA)
- Tasas de crecimiento forestal muy altas, gracias a suelos fértiles, buena disponibilidad hídrica y un clima templado húmedo nos da ciclos de rotación cortos, de 18 a 20 años, con posibilidad de raleos a los 8-Conectividad logística, con acceso a los corredores viales nacionales 12 y 14, y cercanía a los



puertos de Corrientes y Posadas. Además, el puerto de Ituzaingó se encuentra en las etapas finales de puesta en marcha.

En comparación regional, Argentina presenta un equilibrio atractivo:

- Más infraestructura y bosques desarrollados que Paraguay.
- Menor competencia industrial y costos de materia prima que Brasil.
- Menor competencia por el recurso forestal que Chile, donde grandes empresas como Arauco y CMPC concentran el mercado.
- Costos de producción más competitivos que en Estados Unidos o Canadá.

Desafíos del abastecimiento.

- Falta de infraestructura, especialmente en el mantenimiento de caminos y rutas para poder acceder a los frentes de cosecha.
- Aunque es algo que viene mejorando, todavía existe bastante informalidad en el mercado.
- Retraso en inversión tecnológica adecuada para un aprovechamiento óptimo y eficiente de la materia prima. Cosechadoras, cargadoras, camiones.
- Falta de certificación. La certificación es cada vez más la llave para entrar a ciertos mercados. No tenerla puede significar perder oportunidades comerciales.

Mercado y productos

El desarrollo comercial también evolucionó junto al proyecto. Inicialmente se buscó manejar altos volúmenes de producción en pocos productos, pero luego se optó por diversificar para ganar flexibilidad y desarrollar mercados de mayor rentabilidad.

Durante los primeros años, el abanico de productos creció ampliamente, y posteriormente se consolidó hasta llegar hoy, a una gama de aproximadamente 70 productos, adaptados en medidas y calidades según los requerimientos de los clientes.

Las ventas se centralizan en la casa matriz en Viena, desde donde se coordinan los mercados internacionales y la estrategia comercial global del grupo.

Desafíos de la Exportación.

- Tributación y devoluciones de exportación. El régimen de reintegro de exportaciones y el recupero del IVA representan instrumentos clave para mejorar el flujo de caja del exportador argentino, pero requiere de gran cantidad de trámites concatenados, sumamente engorrosos que incluyen el cierre de permisos aduaneros, liquidación de divisas, y cruzamientos entre organismos que se supeditan a los tiempos de las instituciones estatales, las cuales no se caracterizan por su agilidad. Se sabe que hoy se están pagando devoluciones de febrero 2024. Esta situación erosiona la competitividad del exportador al incrementar el costo financiero del capital de trabajo.
- Logística, infraestructura y costos internos. En el ámbito logístico, Argentina presenta brechas importantes frente a sus pares. Los costos logísticos en el país se ubican hasta 43 % por encima del promedio latinoamericano, y que exportar un contenedor podría costar 150 % más que hacerlo desde puertos como Valparaíso (Chile). Además, la infraestructura modal muestra debilidad: predominan los camiones en el transporte de carga (~91 %) y las redes ferroviarias y navales tienen baja cobertura, lo que agrava los tiempos y costos del tramo “fábrica al puerto”. A este escenario se suman requerimientos específicos como los “certificados de exención waiver”, que intervienen cuando la carga argentina se embarca bajo acuerdos de bandera u otros tratados bilaterales, agregando pasos documentales adicionales y potenciales demoras en el despacho aduanero.
- Burocracia, falta de digitalización y barreras regulatorias. Otro vector de desafío es la cantidad de trámites y regulaciones que complican el comercio exterior: autorizaciones de exportación, permisos



aduaneros, documentación sanitaria, tasas varias y regulaciones de liquidación de divisas. A ello se suma un bajo nivel de digitalización en los procesos logísticos y aduaneros, lo que reduce la agilidad frente a mercados de competencia global, y regula la capacidad de responder a demanda internacional con eficiencia.

Conclusión

Hoy, Acon representa un ejemplo de industrialización eficiente basada en recursos renovables, resultado del trabajo en equipo con una visión enfocada hacia el futuro. El desafío continúa: seguir creciendo, sumar valor y consolidar a Virasoro como un polo forestal-industrial de referencia en Sudamérica y a Argentina como actor principal en el mercado global de los productos forestales.



CONTRIBUCIONES VOLUNTARIAS



FERTILIZACIÓN DE *Eucalyptus benthamii* MAIDEN & CAMAGE EN ALBARDONES DEL DELTA DEL PARANÁ. RESULTADOS A LOS 6 AÑOS

Ana María LUPI¹; Helena RIMSKY-KORSAKOV²; Ignacio FOSCO³; Juan Manuel GARCÍA CONDE³; María Silvana MONTEVERDE⁴

RESUMEN

Se evaluó a los 6 años y 9 meses, la respuesta de *Eucalyptus benthamii* a la fertilización con nitrógeno (N) y fósforo (P) en albardones del Delta del Paraná a los 30 días de la plantación. Se utilizó un diseño factorial con dos factores (N y P), con tres niveles cada uno (0, 21, 42 g N planta⁻¹; 0, 18, 36 g P planta⁻¹). Al momento de la fertilización no se observaron diferencias en altura y diámetro a la altura del pecho (DAP) entre tratamientos. Transcurridos 6 años y 9 meses desde la fertilización, se detectaron aumentos significativos en el área basal (m² ha⁻¹) y volumen (m³ ha⁻¹) en respuesta a la fertilización nitrogenada, sin observar respuesta a la aplicación de P. No se encontraron diferencias entre las dosis de N evaluadas.

Palabras clave: nitrógeno, fósforo, eucalipto, fertilización

1. INTRODUCCIÓN

El género *Eucalyptus* presenta altos requerimientos de nitrógeno (N) y fósforo (P), siendo la disponibilidad de estos nutrientes un factor determinante en la productividad de las plantaciones (Gonçalves, 1995; Silva et al., 2007; Gonçalves et al., 2013). En sitios con deficiencias nutricionales, las plantaciones de eucalipto responden positivamente a la aplicación de fertilizantes, especialmente durante los dos primeros años, cuando aún no se ha producido el cierre de copas (Cromer et al., 1993; Champion et al., 2006; Allbaugh et al., 2015). Durante esta etapa inicial, la alta demanda nutricional coincide con el rápido crecimiento de biomasa y expansión radicular (Gonçalves et al., 2013). Una vez alcanzado el cierre del dosel, la competencia por la luz limita el crecimiento, y la eficiencia en el uso de fertilizantes disminuye (Silva et al., 2013). Posteriormente, el ciclo bioquímico del sitio se estabiliza y la respuesta a la fertilización puede volverse más variable.

Snowdon y Waring (1981) y Snowdon (2002) describen dos tipos de respuestas a tratamientos silvícolas como la fertilización en plantaciones forestales:

- Respuesta de Tipo I: incremento temporal en la tasa de crecimiento, sin efecto duradero en la productividad del sitio.
- Respuesta de Tipo II: aumento sostenido en la productividad debido a mejoras permanentes en las propiedades del suelo.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta de *E. benthamii* a distintas dosis de N y P, a los 6 años y 9 meses desde la aplicación de fertilizantes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se llevó a cabo en albardones del Delta del Paraná, en el predio forestal Oasis de la empresa Arauco Argentina S.A. (AASA), ubicado en Campana, provincia de Buenos Aires, Argentina. Este predio se encuentra rodeado por un dique perimetral que actúa como protección frente a inundaciones y cuenta con un sistema de compuertas, bombas de extracción y canales primarios y

¹ Instituto de Suelos, CIRN, INTA, Hurlingham, Argentina. E-mail: lupi.ana@inta.gob.ar

² Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, FAUBA, Buenos Aires, Argentina. E-mail: rimski@agro.uba.ar

³ Profesional Independiente

⁴ Arauco Argentina S.A. Gerencia Forestal. E-mail: maria.monteverde@arauco.com



secundarios para el manejo del agua. Estos albardones son formaciones de origen fluvial generadas por la acumulación de sedimentos, caracterizadas por una mayor elevación respecto del terreno circundante. El suelo del sitio presenta textura franco-arenosa en el primer metro de profundidad, con un contenido de carbono orgánico (CO) del 6,04 %, nitrógeno total (NT) del 0,69 % y fósforo (P) disponible de 21,4 ppm en los primeros 10 cm. A partir de esa profundidad, se incrementa la presencia de sodio ($PSI > 18,9$), disminuyendo los niveles de CO y NT. La conductividad eléctrica (CE) indica un suelo sódico no salino, con valores entre 1,2 y 2,37 dS m⁻¹.

La plantación de *E. benthamii* se realizó en octubre de 2017 con plantines provenientes del vivero de AASA, originados a partir de semillas del Área Productora de Semilla (APS) de Candoi, estado de Paraná, Brasil (Golden Tree). La preparación del terreno incluyó una pasada de rastra y la construcción de camellones. La densidad de plantación fue de 2380 plantas ha⁻¹, con un espaciamiento de 3 m entre hileras y 1,4 m entre plantas. En cuanto al manejo, se realizaron controles de malezas y hormigas pre y postplantación, más intensivos los primeros años y luego los convencionales para mantener en buen estado general el ensayo.

Los tratamientos de fertilización se aplicaron según un diseño experimental factorial de 3x3: tres niveles de nitrógeno (0 g, 21 g, 42 g por planta) y tres niveles de fósforo (0 g, 18 g, 36 g por planta), distribuidos en cuatro bloques completos al azar, totalizando nueve tratamientos (0N0P, 21N0P, 42N0P, 0N18P, 0N36P, 21N18P, 21N36P, 42N18P y 42N36P). Los fertilizantes se aplicaron en forma de corona alrededor de las plantas, a una distancia de 30 a 40 cm del cuello a los 30 días de la plantación. Como fuente de N se aplicó Urea (46-0-0) y como fuente de fósforo superfosfato triple (0-47-0).

De cada parcela, de 56 plantas (7 x 8) con bordura exterior, se evaluaron 30. En julio de 2024, a 6 años y 9 meses de la fertilización, en cada parcela se midió el diámetro a la altura del pecho (DAP; cm) de todas las plantas y la altura total (m) de 6 plantas. A partir del DAP y altura se ajustó una ecuación para estimar la altura total de todos los individuos de las parcelas y se calculó el área basal (AB; m² ha⁻¹) y el volumen acumulado (Vol; m³ ha⁻¹).

Las variables fueron analizadas mediante ANVA factorial y las medias comparadas mediante test de Tukey ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico no refleja interacciones significativas entre las dosis de N y P ($p > 0,05$) para ninguna de las variables analizadas, por lo que el análisis se realizó por separado para cada factor. La fertilización fosforada no generó diferencias significativas en ninguna de las variables evaluadas. Por el contrario, la aplicación de N incrementó significativamente el área basal, el volumen y la mortalidad (Cuadro 1). Ni el DAP ni la altura media fueron afectados por la fertilización. El DAP promedio fue de 12,7 cm y la altura total promedio de 16,7 m. A modo comparativo, para una edad similar Monteverde et al. (2020) registraron un DAP promedio de 17,1 cm y altura media de 21,13 m para esta especie. Probablemente las diferencias se expliquen por el tipo de suelo y el origen del material genético (semilla proveniente de un APS de la empresa SAPPI de Sudáfrica). El suelo en el experimento presenta niveles de sodio intercambiable (PSI) que superan valores críticos y lo clasifican como suelo sódico. Por otro lado, en un rodal operativo raleado de 8 años (con material genético del mismo origen que el ensayo presentado) se registraron valores de DAP promedio de 17,7 cm y 21,7 m (Monteverde, S., 2025; *comunicación personal*). Al comparar los crecimientos a similar edad de *E. benthamii* con clones híbridos comerciales de *E. grandis* x *E. camaldulensis* se observa que la altura media es similar a la registrada para estos creciendo en un suelo Molisol y Vertisol de SE de Entre Ríos (Harrand et al., 2024).

El AB en el tratamiento testigo fue 16 % y 19 % menor respecto de los tratamientos 21N0P y 42N0P, respectivamente, aunque las diferencias no resultaron significativas entre las dosis de N aplicadas. El incremento medio anual en volumen (IMA Vol) fue 18 % y 21,5 % mayor en los tratamientos 21N y 42N, respectivamente, en comparación con el testigo. Aunque la dosis de 42N incrementó el porcentaje de fallas, el valor nominal se considera no relevante. El IMA registrado en las dosis 21N es similar al reportado por Monteverde et al. (2020) para la misma especie a similar edad.



Cuadro 1. Variables dasométricas de *E. benthamii* a los 6 años y 9 meses para las diferentes dosis de N y P.

Tratamiento	DAP		Altura		Mortalidad		AB		Volumen		IMA
	(cm)		(m)		(%)		(m ² ha ⁻¹)		(m ³ ha ⁻¹)		(m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹)
0N	12,4	A	16,5	A	20,8	B	21,73	B	185,26	B	27,65
21N	13,1	A	17,0	A	21,1	AB	25,83	A	225,41	A	33,64
42N	13,1	A	16,9	A	21,4	A	26,70	A	236,02	A	35,23
0P	12,4	A	16,7	A	21,2	A	24,75	A	216,41	A	32,30
18P	12,6	A	16,5	A	20,9	A	24,26	A	209,20	A	31,22
36P	13,2	A	17,0	A	21,3	A	25,26	A	221,07	A	33,00

Los números que anteceden a las letras N y P indican los gramos de cada nutriente aplicados por planta. Para cada variable, letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas entre los niveles de cada nutriente.

El patrón de respuesta observado a los 6 años y 9 meses (respuestas positivas a las dosis de N y ausencia de respuestas a las dosis de P) ya habían sido registradas en altura media a los 3 y 8 meses posteriores a la fertilización (Lupi et al., 2019), y persistieron a los 3 años y 8 meses, con diferencias en DAP y AB (Lupi et al., 2022). Por su parte, la fertilización fosforada no generó diferencias en DAP ni altura en mediciones previas.

Los resultados evidencian que la oferta de N del suelo no fue suficiente para satisfacer la demanda de *E. benthamii* en el tratamiento sin N y las diferencias en crecimiento iniciales persisten en el tiempo. Esto coincide con Gonçalves et al. (2008), quienes señalan la baja fertilidad de los suelos destinados a plantaciones de eucalipto en Brasil. Asimismo, Melo et al. (2016) demostraron que la aplicación de N, P y K puede incrementar significativamente la productividad de madera sólida, dependiendo de las condiciones edafoclimáticas.

Independientemente de los tratamientos, se evidencia la necesidad de realizar un raleo para optimizar el crecimiento, tal como se sugiere en Lupi et al. (2022), donde una reducción en el número de individuos hubiese potenciado la respuesta a la fertilización. Además, los resultados obtenidos hasta el momento indican la necesidad de continuar con las evaluaciones.

4. CONCLUSIONES

A los 6 años y 9 meses de la fertilización, *Eucalyptus benthamii* respondió positivamente a la fertilización inicial con N. El área basal y el volumen por hectárea aumentaron significativamente con la aplicación de N, sin diferencias entre dosis; con 21 g de nitrógeno por planta es posible mejorar el crecimiento. La fertilización con P no generó respuestas significativas en ninguna de las variables evaluadas.

AGRADECIMIENTOS

Este experimento fue parcialmente financiado por la empresa Arauco Argentina S.A. mediante un convenio de vinculación tecnológica INTA-ARAUCO.

5. BIBLIOGRAFIA

- ALBAUGH, T.J.; RUBILAR, R.A.; FOX, T.R.; LEE A.H.; URREGO, J.B.; ZAPATA, M.; STAPE, J.L. 2015 Response of *Eucalyptus grandis* in Colombia to mid-rotation fertilization is dependent on site and rate but not frequency of application. *Forest Ecology and Management* 350: 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.04.030>
- CAMPION, J.M.; NKOSANA, M.; SCHOLE, M.C. 2006. Biomass and N and P pools in above- and below-ground components of an irrigated and fertilized *Eucalyptus grandis* stand in South Africa. *Aust. For.*, 69(1): 48-57.
- CROMER, R.N.; CAMERON, D.A.; RANCE, S.J.; RYAN, P.A.; BROWN, M. 1993. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 1. Biomass accumulation *For. Ecol. Manage.* 62: 211-230



- GONÇALVES, J.L.M., STAPE JL, LACLAU JP, BOUILLET JP, RANGER J. 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *South Forests*. 70:105-18. <https://doi.org/10.2989/south.for.2008.70.2.6.534>
- GONCALVES, J.L.; ALVARES, CA; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.; HUBNER, A; BOUILLET, J.O.; LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; EPRON D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations *For. Ecol. Manage.* 301:6-27
- GONÇALVES, J.L.M. 1995. Recomendações de adubação para *Eucalyptus*, *Pinus* e espécies típicas da Mata Atlântica. Piracicaba, Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, 23p. (Documentos Florestais, 15)
- HARRAND, L.; OBERSCHELP, G.P.J.; SALTO, C.S. 2024. Forestación con clones de híbridos de eucalipto en la zona centro-norte de Entre Ríos, Argentina. XXXVIII Jornadas Forestales Entre Ríos. 5p.
- LUPI, A.M.; RIMSKI-KORSAKOV, H.; FOSCO, I.; PHOELS, M.; TOMMASI, M.; GARCIA CONDE, J.M. 2019. Respuesta del *Eucalyptus benthamii* a la fertilización en albardones del Delta del Paraná. XIII Jornadas Técnica Forestales y Ambientales, Eldorado – Misiones. 17, 18,19 de octubre 2019.
- LUPI, A.M.; RIMSKI-KORSAKOV, H.; FOSCO, I.; GARCIA CONDE, J.M. 2022. Crecimiento de *Eucalyptus benthamii* Maiden & Cabbage fertilizado con N y P en albardones del Delta del Paraná. XXVIII Congreso Argentino de las Ciencia del Suelo: Suelos Saludables, Sustento de la sociedad y el ambiente. AACIS ISBN 978-987-48396-7-1. 658-662pag
- MELO, E.A.S.C.; GONÇALVES, J.L.M.; ROCHA, J.H.T.; HAKAMADA, R.E.; BAZANI, J.H.; WENZEL, A.V.A.; ARTHUR, J.C.; JR., BORGES, J.S.; MALHEIROS, R.; LEMOS, C.C.Z.; FERREIRA, E.V.O.; FERRAZ, A. D.V. 2016. Responses of Clonal Eucalypt Plantations to N, P and K Fertilizer Application in Different Edaphoclimatic Conditions. *Forests* 7(1), 2. <https://doi.org/10.3390/f7010002>
- MONTEVERDE, M.S.; SCHAPOVALOFF, J.; RAUTE, G.; FOSCO, I.; AUSTIN, R. 2020. Evaluación de nuevas especies de eucaliptos para frío en el delta Bonaerense. XXXIV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia Entre Ríos. Pp 16-20.
- SILVA, P.H.M.; POGGIANI, F.; LIBARDI, P.L.; GONÇALVES, A.N. 2013. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. *Forest Ecology and Management* 301: 67-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.033>
- SILVA, C.A.; RANGEL, O.J.P.; BELIZARIO, M.H. 2007. Interação calagem-adubação fosfatada e sua influência nos níveis críticos de P e crescimento do eucalipto. *Sci. For.*, 73:63- 72.
- SNOWDON, P.; WARING, H.D. 1981. Forest fertilisation and thinning practice. In: Proceedings of the IUFRO Regional Thinning Meeting, Economics and Techniques of Thinned Plantations in Australia and New Zealand. CSIRO Division of Forest Research, Canberra, pp. 159–162.
- SNOWDON P. 2002. Modeling Type 1 and Type 2 growth responses in plantations after application of fertilizer or other silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*, 163(1–3), 229-244.



FORESTACIÓN CON CLONES DE HÍBRIDOS COMERCIALES DE *Eucalyptus* EN EL SURESTE DE SANTIAGO DEL ESTERO, ARGENTINA

Ana M. LUPI¹; Pablo LOPEZ ANIDO²; Leonel HARRAND³

RESUMEN

La generación de clones híbridos interespecíficos (*E. grandis* x *E. camaldulensis*- GC-INTA) posibilita la ampliación de la frontera forestal a regiones no tradicionales. En el presente trabajo se presentan los crecimientos obtenidos por dos clones híbridos de eucalipto (GC-INTA-24 y GC-INTA-27). El genotipo GC-INTA 24 se plantó a 3 m x 1,5 m y el GC-INTA-GC27 3 m x 3 m, en Bandera, Santiago del Estero. El suelo en el que se establecieron los rodales proviene de un uso agrícola y se corresponde con un Haplustol de textura franca. A los 30 meses, la altura media de los clones GC-INTA-24 (3 x 1,5) y GC-INTA-27 (3 x 3) fue similar (promedio 9,2 m). El diámetro normal fue 7,4 cm en el GC-INTA-24 y 8,9 cm en el GC-INTA-27. El mayor volumen total (47,2 m³ ha⁻¹) se encuentra en el rodal más denso (GC-INTA-24; 3 x 1,5 m), siendo de 29,9 m³ ha⁻¹ el volumen del genotipo GC-INTA-27; 3 m x 3 m. Según los resultados obtenidos hasta este momento, los híbridos GC-INTA-24 y GC-INTA-27 podrían adaptarse y desarrollarse en la región del SE de Santiago del Estero. Se requiere dar continuidad a las evaluaciones.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis*, Molisoles, Chaco semiárido

1. INTRODUCCIÓN

Santiago del Estero, junto con Chaco, son las provincias extrapampeanas con mayor superficie cultivada con cereales y oleaginosas. La zona de influencia Bandera-Los Juries (Santiago del Estero) se destaca como una de las zonas de mayor crecimiento en la producción de granos de las “nuevas fronteras agrícolas”, basada en el cultivo de soja, maíz y algodón (López Anido y Alonso, 2020). El desmonte y la fuerte agriculturización que vivió la zona de Bandera se basó en la aplicación de tecnología de la pampa húmeda. El reemplazo del bosque y la simplificación productiva ha generado cambios en el régimen hidrológico regional: diversos estudios muestran ascensos en el nivel freático. Esta condición de napa cercana genera rápida respuesta de ascensos de nivel ante lluvias extremas, determinando un aumento en la vulnerabilidad al anegamiento ante periodos de abundante pluviosidad (Schefer et al., 2021). La necesidad de diversificar la producción y la disponibilidad de agua de las napas cercanas a la superficie hizo que algunos productores se planteen la posibilidad de aprovechar sus recursos e impulsar nuevas iniciativas a partir de la producción de biomasa forestal, ya sea para la producción de energía o para madera sólida. A nivel mundial, las plantaciones de eucalipto están siendo utilizadas como un suministro clave de materias primas para productos madereros y no maderables (Chambi-Legoas et al., 2023). A nivel nacional la incorporación de clones a las nuevas plantaciones está en continuo aumento (Dalla Tea, 2020). Estas se realizan con el fin de aprovechar la complementariedad, la adaptabilidad y, en el caso de clones híbridos interespecíficos, el vigor híbrido entre parentales selectos en regiones donde las especies puras tienen limitantes bióticas (plagas y enfermedades), abióticas (riesgo de heladas o sequías, restricciones edáficas), y/o para mejorar determinadas propiedades de la madera (Assis y Mafia, 2007; Harwood, 2011). Los resultados disponibles en la región mesopotámica, donde se concentra la producción del eucalipto, muestran que los clones híbridos de *E. grandis* x *E. camaldulensis* (GC) tienen crecimientos similares o superiores a *E. grandis* -según la condición del sitio-, con valores de forma y sanidad inferiores (Marcó y Harrand, 2005 y 2012). Además, clones como el GC -INTA 24 y GC-INTA- 27 mostraron tener una buena

¹ Instituto de Suelos, INTA Castelar. lupi.ana@inta.gob.ar

² Productor. Bandera, Santiago del Estero

³ EEA Concordia INTA. harrand.leonel@inta.gob.ar



productividad, cierta tolerancia a heladas y mayor densidad de la madera que *E. grandis*, haciéndola apta para diversas aplicaciones (Marco y Harrand 2005; 2012). En Santiago del Estero es escasa la información sobre el crecimiento de los genotipos comerciales que se cultivan en las regiones forestales como Mesopotamia y Pampeana; por lo tanto, el uso comercial requiere de información local que permita definir qué materiales plantar y su manejo. Esta comunicación pretende divulgar los resultados obtenidos de la evaluación del crecimiento de dos clones híbridos INTA-GC hasta los 30 meses de su plantación, en el SE de Santiago del Estero.

2. MATERIALES Y METODOS

En septiembre de 2022 se plantaron 2 rodales con clones comerciales de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis*: GC-INTA-27 y GC-INTA-24. El lote donde se plantaron los rodales proviene de un uso agrícola y se encuentra próximo a la localidad de Bandera (28.62909° S; 62.07099° O), dpto. Belgrano, SE de Santiago del Estero (Argentina), núcleo productivo de mayor historia agrícola e intensidad de deforestación del Chaco semiárido (Giménez et al., 2017). Bandera se ubica en una zona de transición entre el Chaco semiárido y subhúmedo, con una precipitación media anual de 975 mm, con marcada variabilidad interanual en la que se intercalan años muy secos (450 mm) con años húmedos (>1200 mm). La evapotranspiración de referencia ronda los 1450 mm anuales. Los suelos predominantes son de textura franco-limosa y franco arcillo-limosa, del orden Molisol. La zona estaba originalmente dominada por bosques secos (Giménez et al., 2017).

El clon GC-INTA-27 se plantó a 3 m x 3 m, mientras que el GC-INTA-24 a 3 m x 1,5 m. El rodal del clon GC-INTA-27 se establecieron 3 parcelas permanentes de 441 m² en tanto que en el clon GC-INTA-24, 4 parcelas permanentes de 220 m². En ambos casos originalmente contaban con 25 plantas efectivas de medición y una línea de bordura. En cada rodal se realizaron 4 mediciones: a los 6 (4/23), 13 (11/23), 23 (9/24) y 30 (4/25) meses de la plantación. El diámetro normal (DAP) se midió a partir de los 13 meses en todos los individuos de las parcelas. A los 6 y 13 meses se midió la altura total de todas las plantas de la parcela. A los 23 y 30 meses se seleccionaron individuos distribuidos en rangos diamétricos y se relevaron 6 alturas por parcela. Con los pares DAP-altura se ajustaron modelos para estimar la altura total de todos los individuos de las parcelas. Se calculó el área basal (AB) por individuo y el valor por hectárea. Con los datos de AB y altura se calculó el volumen individual y el volumen por hectárea. Para el cálculo del volumen se empleó un coeficiente mórfico general de 0,5. Se presentan los datos promedio de sobrevivencia y crecimiento y medidas de dispersión de cada clon.

En cada rodal se realizó un muestreo de suelo para caracterizar la condición del sitio, tomando muestras de las profundidades 0-20 cm y 20-40 cm. Se realizaron las siguientes determinaciones: Conductividad eléctrica en extracto de pasta de saturación (CE_{ex}) Potencial Hidrógeno en extracto de pasta de saturación (pH_{ex}) Fósforo extractable por Olsen (P; ppm); Carbono Orgánico Total por Walkley Black (COT = CO x 1,3); Nitrógeno total por NIRS (Nt) y Textura por Bouyoucus. Los resultados del análisis de suelo (Cuadro 1) muestran que el mismo presenta niveles medios a bajos de COT, adecuados niveles de Nt y altos niveles de P. El pH de los dos sitios es levemente ácido a neutro. Si bien no presentan limitantes, la CE del suelo donde se encuentra el INTA-GC-27 aumenta con la profundidad (datos no mostrados) alcanzando un valor cercano a 4 dS/m (límite para calificar a un suelo salino).

Cuadro 1. Características del suelo en los lotes plantados con 2 clones híbridos *E. grandis* x *E. camaldulensis*

	Profundidad (cm)	CE _{ex} (dSm ⁻¹)	pH _{ex}	P (ppm)	COT (%)	Nt (%)	Clase textural
GC-INTA-27	0-20	0,52	6,4	25,5	1,6	0,16	Franco limosa
	20-40	0,63	6,9	15,1	1	0,11	Franco arcillosa
GC-INTA-24	0-20	0,83	6,7	24,2	1,6	0,19	Franco arc. limosa
	20-40	0,74	6,7	21,1	1,1	0,1	Arcillosa limosa

CE_{ex}: Conductividad Eléctrica; P: Fósforo; COT: Carbono Orgánico Total; Nt: Nitrógeno total



En la Figura 1 se muestran las precipitaciones diarias y las temperaturas medias, mínimas y máximas diarias desde octubre de 2022 hasta febrero de 2025. Desde el 1 de octubre de 2022 hasta el 30 de septiembre de 2023 llovieron 437,5 mm, desde el 1 de octubre de 2023 hasta 30 de septiembre de 2024 llovieron 572 mm y desde el 1 de octubre de 2024 hasta 27 de febrero de 2025 llovieron 389 mm. Durante el periodo analizado se observan temperaturas extremas de 45 °C y -6 °C.

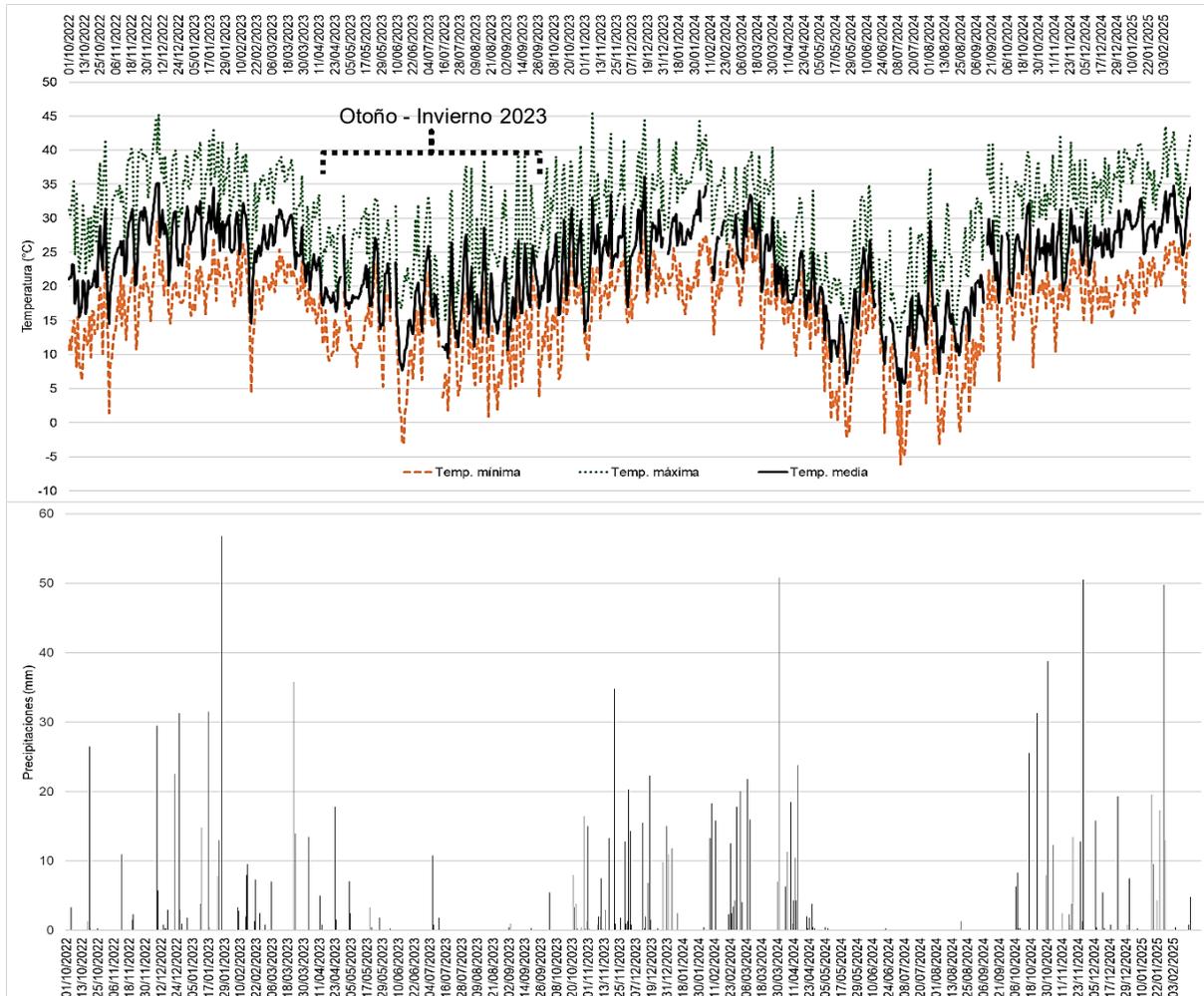


Figura 1. Precipitación diaria (abajo), temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima diaria desde octubre 2022 a febrero de 2025 (arriba) en la localidad de Bandera, SE Santiago del Estero (Fuente: Estación Meteorológica INTA Bandera).

3. RESULTADOS Y DISCUSION

A los 6, 12 y 30 meses de edad la sobrevivencia fue del 90 %, 88 % y 88 % respectivamente, para el GC-INTA-27 y 98,6 %, 97 % y 97 % para el GC-INTA-24. La sobrevivencia en el GC-INTA-27 fue algo menor debido a la mayor mortalidad de una parcela de ese lote, probablemente por efecto de herbicidas. A los 30 meses de la plantación (abril de 2025) la altura media de las plantas fue de 9,05 m y 9,45 m, para la plantación de GC-INTA-27 y de GC-INTA-24, respectivamente (Cuadro 2). El DAP medio fue 8,96 cm para el clon GC-INTA-27 y 7,44 cm para el GC-INTA-24. Los crecimientos en altura, DAP y volumen a los 30 meses son comparables a los informados para otros clones (EG-INTA-35; EG-INTA-152 y EG-INTA-164) en suelos vertisoles (arcillosos) del centro-sur de la provincia de Corrientes y en Entisoles (arenosos hidromórficos) del centro-oeste de Corrientes, con 3 años y crecimientos medios a buenos (López et al., 2015; Harrand et al., 2024). Comparada con los datos informados por López et al. (2024) se observa que la altura promedio a los 30 meses es similar a la altura de 15 clones a los 17 meses, en un sitio con un suelo rojo arcilloso de Corrientes, de muy alto potencial de crecimiento para *E. grandis*. En la Figura 2 se observa la evolución de la altura total de las plantas de los dos clones en el periodo de evaluación.



Cuadro 2. Valores medios de altura total, diámetro normal (DAP), volumen individual (Vol), volumen por hectárea, e incrementos anuales (IMA), de los clones híbridos GC-INTA-27y GC-INTA-24 a los 30 meses.

	Altura (m)	IMA Alt (m año ⁻¹)	DAP (cm)	IMA DAP (cm año ⁻¹)	Vol Medio dm ³	Vol/ha (m ³ ha ⁻¹)	IMA Vol (m ³ ha ⁻¹ año)
GC-INTA-27	9,05 ±0,39	3,6	8,90 ±0,67	3,6	30,33 ±6,20	33,70 ±19,01	13,5
GC-INTA-24	9,45 ±0,10	3,7	7,44 ±0,20	2,9	21,22 ±1,35	45,88 ±3,01	18,3

En los primeros 6 meses crecieron en promedio 2 m, luego entre los 6 y 13 meses, los genotipos crecieron 1,4 m (periodo otoño-invierno 2023). Los siguientes 10 meses, los dos genotipos, en promedio crecieron 3 m. En el último período de crecimiento evaluado crecieron 2,6 m.

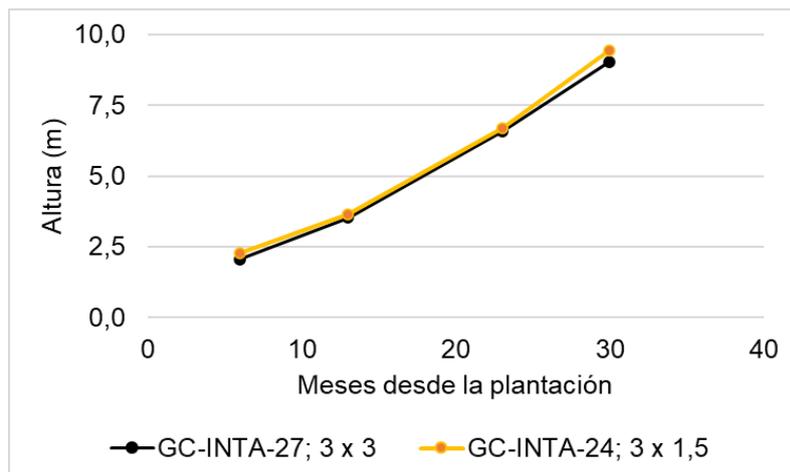


Figura 2. Evolución del crecimiento en altura total por clon

En la Figura 3a y 3b se presenta la evolución del área basal y del volumen total para cada genotipo. A los 30 meses el volumen a nivel de árbol individual fue de 0,0303 m³ para el genotipo GC-INTA-27y de 0,0212 m³. Para GC-INTA-24.

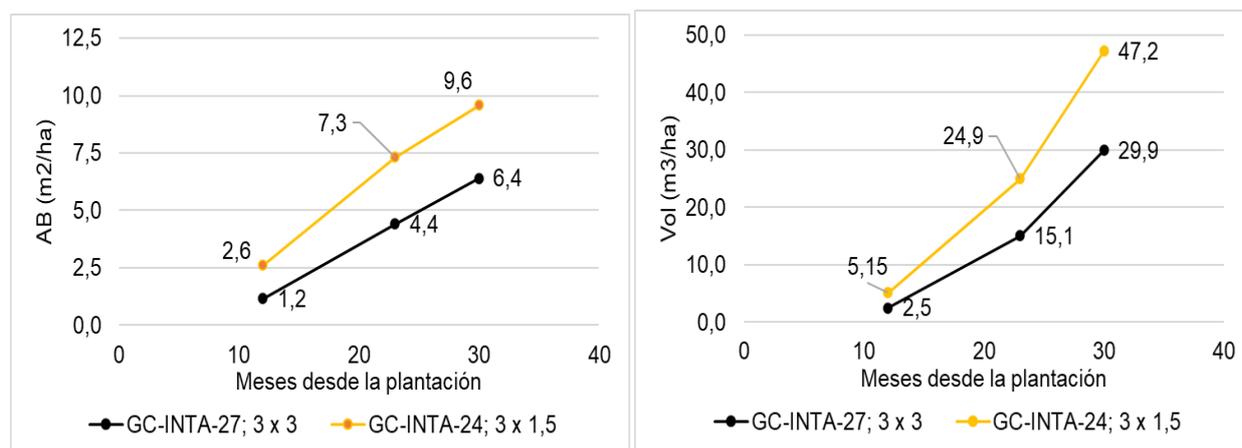


Figura 3a: Evolución del área basal por ha de 2 clones de *E. grandis* x *E. camaldulensis*

Figura 3b: Evolución del volumen/ha de 2 clones de *E. grandis* x *E. camaldulensis*

Hasta los 30 meses no se observan plagas ni enfermedades. El clon GC-INTA-24 mostró mayor sensibilidad al frío, lo cual se verificó por los ápices muertos en la medición realizada a los 23 meses, luego del invierno 2023. Los crecimientos obtenidos hasta la fecha muestran un comportamiento inicial satisfactorio y comparable a los registrados en otras regiones.



4. CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados obtenidos a la fecha nos permiten señalar que los híbridos GC-INTA-24 y GC-INTA-27 poseen un interesante potencial de crecimiento para la región del SE de Santiago del Estero. Se requiere continuar las mediciones y ampliar la base de prueba de los genotipos bajo diferentes esquemas de plantación.

AGRADECIMIENTOS. A los muchachos que apoyaron en las mediciones y al productor por su mirada a la diversificación productiva.

5. LITERATURA CONSULTADA

- ASSIS, T. F.; MAFIA, R.G. 2007. Hibridação e clonagem. In: Borém, A. (Ed.) *Biotecnologia florestal*. Viçosa, MG: [s.n.]: 93-121.
- CHAMBI-LEGOAS, R.; TOMAZELLO-FILHO, M.; LACLAU, J.P.; CHAIX, G. 2023. Potassium fertilization enhances xylem plasticity and growth recovery of *Eucalyptus grandis* trees in response to drastic changes in water availability. *Forest Ecology and Management*, 528 (15): 120656. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120656>
- DALLA TEA, F. 2020. Tecnología del eucalipto: especies y clones para la cuenca del río Uruguay. Recuperado de: <https://maderamen.com.ar/desarrollo-forestal/2020/07/14/tecnologia-del-eucalipto-especies-y- clones-riouruguay/>
- GIMÉNEZ, R.; MERCAU, J. L.; NOSETTO, M. D.; PAEZ, R. A.; MARCHESINI, V. A.; JOBBAGY, E.G. 2017. Indicios de salinización secundaria en el sudeste santiagueño: ¿la punta de un iceberg para la sustentabilidad de la agricultura en el chaco semiárido? V Reunión de la RAS: Salinidad un desafío para el semiárido AACs. ISBN: 978-987-42-5601-0
- HARRAND, L.; OBERSCHELP, J.O.; SALTO, C.S. 2024. forestación con clones híbridos de *Eucalyptus* en la zona centro norte de Entre Ríos, Argentina, XXXVIII Jornadas Forestales Entre Ríos. Octubre 2024. 5p. <https://www.jornadasforestales.com.ar/book/2024.php>
- HARWOOD, C. 2011. New introductions-Doing it right. In: Developing a Eucalypt Resource: Learning from Australia and elsewhere. *Wood Tech. Research Centre. Workshop Proc.*: 43-54
- LOPEZ, A. 2015. Comportamiento de clones de *Eucalyptus grandis* del INTA en plantaciones en vertisoles del centro-sur de la provincia de Corrientes Argentina. *Ciencia e Investigación Forestal*, CIFOR, (21):1; 27-36.
- LÓPEZ, A.J.; LÓPEZ, J.A.; STAHRINGER, N.I.; DALURZO, H.C. 2024. Evaluación genética del crecimiento inicial de clones puros e híbridos comerciales de *Eucalyptus* en Corrientes, Argentina XXXVIII Jornadas Forestales Entre Ríos. Octubre 2024. 5p. <https://www.jornadasforestales.com.ar/book/2024.php>
- LOPEZ ANIDO P.; ALONSO. 2020. Red de Ensayos de fertilización en Maíz Bandera - Juries. Campaña 200472005. Análisis de tres sitios y conclusiones generales Profertil
- MARCÓ, M. A.; HARRAND, L. 2005. Valor potencial de los eucaliptos colorados en combinaciones híbridas. I Jornada sobre potencialidad foresto-industrial del eucalipto en Santiago del Estero. Actas en CD. 10 p.
- MARCÓ, M. A.; HARRAND, L. 2012. El Programa de Mejora de Eucaliptos del INTA en la Mesopotamia Argentina. In: López, J. A. et al. (Eds.). *Jornadas de actualización técnica. Mejoramiento de pinos y eucaliptos subtropicales*. Concordia, Entre Ríos, Argentina. Ediciones INTA. ISBN 978-987-679-144-1: 44-48.
- SCHEFER, E; MERCAU, J.L., NOSETTO, M. JOBBÁGY, E.; HOUSPANOSSIAN, J.; MARANO, R.; GIMENEZ R. 2021. El nuevo contexto hidrológico del área agrícola de Bandera, Santiago del Estero, interpretado a partir de datos de nivel freático. 3er Congreso Int. del Gran Chaco Americano: El Gran Chaco: buen vivir, diversidad y desarrollo sostenible/1a ed. Santiago del Estero: EDUNSE, 2021. Libro digital, ISBN 978-987-4456-26-7.
- TINTO, J. 1978. Aportes del sector forestal a la construcción de viviendas. Folleto Técnico Forestal N° 44. Segunda Edición. Argentina. pp. 142.



EVALUACIÓN PRELIMINAR DE CLONES PUROS E HÍBRIDOS DE *Eucalyptus* EN EL SUR ESTE DE SANTIAGO DEL ESTERO, ARGENTINA

Francisco BULA¹; Ana María LUPI²; Esteban BORODOWSKI³; Edmundo RUVEDA⁴

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar el comportamiento inicial de seis clones comerciales de *Eucalyptus* en condiciones de la ecorregión del Chaco seco, en el sur este de Santiago del Estero, Argentina. Los materiales incluyen un clon puro de *E. grandis* y cinco híbridos con *E. urophylla* y *E. camaldulensis*. El ensayo fue instalado en octubre de 2022 en la localidad de Bandera, Santiago del Estero y se realizaron tres mediciones: una evaluación del daño por heladas (julio 2023), y dos mediciones de crecimiento y supervivencia (marzo 2023 y abril 2024). Los resultados muestran diferencias marcadas en la sensibilidad al frío entre los clones, destacándose el clon X-78 como el más tolerante. Los clones con parentales de *E. camaldulensis* mostraron una buena resiliencia frente a eventos de helada, así como uno de los clones con parental de *E. urophylla*. Este ensayo exploratorio representa un primer paso hacia la identificación de materiales genéticos adecuados para promover la forestación con especies de rápido crecimiento para esta región.

Palabras claves: *Eucalyptus*, material clonal, heladas, crecimiento

1. INTRODUCCIÓN

La provincia de Santiago del Estero presenta un marcado predominio del uso forestal basado en el aprovechamiento del bosque nativo, con escasa superficie implantada con especies exóticas. Sin embargo, en el marco de la necesidad de diversificar la matriz productiva forestal, se han explorado alternativas basadas en plantaciones de especies del género *Eucalyptus*, reconocidas por su rápido crecimiento, versatilidad de uso y adaptabilidad a distintas condiciones ambientales.

Entre las especies más utilizadas en Argentina se destacan *E. grandis* y *E. camaldulensis*. *E. grandis* es altamente productiva en condiciones subtropicales húmedas pero sensible a heladas, mientras que *E. camaldulensis* muestra buena rusticidad, tolerancia a sequía y heladas, aunque con menor velocidad de crecimiento. *E. urophylla* es una especie que puede aportar mayor tolerancia al estrés abiótico y una buena adaptabilidad edafoclimática. La hibridación entre estas especies ha dado lugar a materiales genéticos de alto rendimiento y mayor resiliencia, como los clones híbridos de *E. grandis* × *E. urophylla* y *E. grandis* × *E. camaldulensis*. Marcó y Harrand (2005) indican que los híbridos tienen un gran potencial como exóticas toda vez que pueden generarse árboles para ambientes específicos o ambientes marginales (sitios de baja productividad con algún elemento de riesgo), con mayor resistencia a heladas, plagas y enfermedades, o con ciertas propiedades de madera.

Este trabajo presenta los resultados preliminares de un ensayo instalado en el departamento Belgrano, al sur este de Santiago del Estero, con el objetivo de evaluar el comportamiento inicial de seis clones comerciales de *Eucalyptus* en condiciones de la ecorregión del Chaco seco, con especial atención a su sensibilidad a heladas y supervivencia.

¹ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Estudiante. fbula@agro.uba.ar

² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Instituto de suelos-CIRN. lupi.ana@inta.gob.ar

³ Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Cátedra de Dasonomía. borodows@agro.uba.ar

⁴ Productor Agropecuario.



2. MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se estableció en octubre de 2022 en un sitio experimental ubicado en cercanías de la localidad de Bandera, departamento Belgrano, provincia de Santiago del Estero (28°53'29.94" S; 62°16'57.97" O). El área de estudio presenta un clima subtropical subhúmedo, que concentra más del 70 % de las precipitaciones anuales (889 mm promedio) entre noviembre y marzo, acompañado por temperaturas elevadas (media anual de 21,7 °C) y alta evapotranspiración (promedio 2003-2021, 1.037 mm). El periodo libre de heladas se extiende desde mediados de octubre hasta mediados de abril. Este contexto climático define una marcada estacionalidad hídrica que incide directamente en los ciclos productivos (Vizgarra, 2023). Según las cartas de suelos del INTA, escala 1:500.000 (<https://visor.inta.gob.ar/es#3/-26.5/-66.34>), el área de trabajo se encuentra en la unidad cartográfica Asociación MNtc-11 integrada por dos suelos: 1) Argiustoles údicos, suelos agrícolas, profundos; los carbonatos libres se manifiestan en el perfil desde los 50 cm de profundidad y 2) Haplustoles típicos, de aptitud de uso variado; los carbonatos libres se presentan desde los 50 cm de profundidad. La profundidad de la napa freática es de 3,07 m (INTA AER Bandera, 2025). Las principales limitantes de este ambiente son el clima y la baja capacidad de retención de agua del suelo. Se evaluaron seis clones comerciales: un clon puro de *E. grandis* (T-2136) y cinco híbridos (X-26, X-44, X-57, X-78 y X-130), producto de combinaciones entre *E. grandis*, *E. urophylla* y *E. camaldulensis* (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clones comerciales evaluados (Fuente: Pomera maderas, 2024).

Código	Genotipo	Características
T-2136	<i>E. grandis</i>	Selecto de una plantación comercial de Paraguay, establecido en suelo rojo arcilloso profundo. Buen crecimiento y alta tolerancia al frío.
X-44	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	Clon híbrido importado de Sudáfrica. Crecimiento bueno con un arranque inicial favorable y responde bien a la liberación de espacio por raleos. Su tolerancia al frío es alta.
X-78	<i>E. grandis</i> x <i>E. camaldulensis</i>	Clon híbrido importado de Australia. Destaca frente a otros clones de la misma hibridación por su alta tolerancia a <i>Leptocybe invasa</i> . Buen crecimiento y alta tolerancia al frío.
X-26	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Clon híbrido importado de Sudáfrica. Crecimiento bueno con un arranque inicial favorable y responde bien a la liberación de espacio por raleos. Su tolerancia al frío es media.
X-57	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Clon híbrido importado de Brasil. Buen crecimiento. Excelente aptitud para postes. Tolerancia baja al frío.
X-130	<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	Clon híbrido importado de Australia. Crecimiento inicial bueno. Responde bien al espaciamiento entre plantas. Baja tolerancia al frío. Buena recuperación al daño por heladas.

La plantación se realizó el 22 de octubre del 2022 sin uso de fertilizantes. En el ensayo se plantaron 80 individuos por clon, distribuidos en 10 hileras de 8 plantas cada una, con un espaciamiento de 3 m entre hileras y 2 m entre plantas sobre hilera. El diseño no incluyó replicación ni aleatorización por bloques, lo que se reconoce como una limitación para la inferencia estadística y por lo cual, los resultados deben interpretarse como una evaluación exploratoria sujeta a limitaciones metodológicas. En el Cuadro 2 se muestra las condiciones climáticas de la zona de Bandera desde la plantación hasta la última fecha de medición (<https://siga.inta.gob.ar/#!/data>) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Promedio de temperaturas anual media, máxima y mínima (en °C) y precipitación anual (en mm) de los años del ensayo de Bandera – EEA Quimilí.

Año	Temp. Máx. Promedio	Temp. Min. Promedio	Temp. Media	Precipitaciones
		(°C)		(mm)
2022	28,9	13,2	20,7	589
2023	29,8	15,9	22,3	559
2024	28,9	15,4	21,5	650

Se realizaron tres evaluaciones: en marzo de 2023 (5 meses desde la plantación) se midió altura total (cm), diámetro a la altura del cuello (mm) y supervivencia; en julio de 2023 (9 meses desde la



plantación) se registró el daño por heladas mediante una escala visual de 1 (sin daño) a 10 (muerte total del individuo); y en abril de 2024 (18 meses desde la plantación) se repitieron las mediciones de crecimiento y supervivencia. Se realizó un análisis descriptivo por clon y comparaciones exploratorias mediante pruebas no paramétricas (Kruskal-Wallis), considerando la falta de replicación formal.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Daño por heladas: Los resultados muestran una alta variabilidad en la respuesta al daño por heladas entre clones (Gráfico 1). El clon X-78 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) y el X-57 (*E. grandis* x *E. urophylla*) presentaron los menores niveles de daño (media: 1,10 y 2 respectivamente en la escala), y muy poca variabilidad entre individuos. Por el contrario, el clon T-2136 (*E. grandis*) mostró alta sensibilidad (media: 6,70), seguido del clon X-26 (*E. grandis* x *E. urophylla*) (media: 5); con una alta variabilidad entre individuos. En el clon T-2136, el daño por helada se relacionó inversamente con la altura de la planta ($r = -0,86$). Los resultados de Laddaga y Milione (2019) en el centro-sur de Buenos Aires indican que, el clon X-57 (*E. grandis* x *E. urophylla*) presentó una tolerancia similar al T-2136 (*E. grandis*). El clon X-130 (*E. grandis* x *E. urophylla*) y X-44 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) mostraron similar comportamiento entre ellos, levemente más afectados que X-78 y X-44. Es importante tener en cuenta que este relevamiento de daño por helada solo abarcó una parte del primer invierno post plantación.

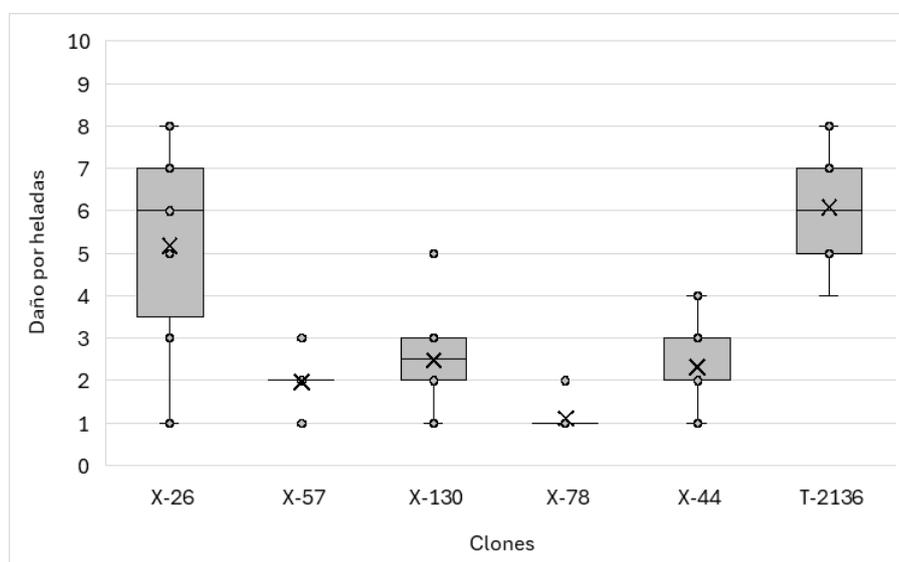


Gráfico 1. Comportamiento del daño por heladas según el clon, a los 9 meses de la plantación. Referencias: X-26: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-57: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-130: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-78: *E. grandis* x *E. camaldulensis*; X-44: *E. grandis* x *E. camaldulensis*; T-2136: *E. grandis*

Supervivencia: el clon X-78 y X-44 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) presentaron los más altos niveles de supervivencia (> 96%), con poca variación entre los dos momentos de evaluación. X-57 y X26 (*E. grandis* x *E. urophylla*), presentaron valores intermedios (entre 90-96%). El clon X-130 (*E. grandis* x *E. urophylla*) fue el de menor supervivencia dentro de los clones híbridos. El clon puro T-2136 (*E. grandis*) fue el de menor supervivencia (también el más afectado por las heladas). A los 5 meses de la plantación fue del 50% y descendió al 44% a los 18 meses. Esta menor supervivencia se correspondió con las plantas de menor altura, más afectadas con heladas y en un sector con heterogeneidad edáfica. A pesar de haber sufrido bastante daño el clon X-26 no vio afectada su supervivencia (90 % en abril de 2024). Este comportamiento difiere a lo observado por Maggio et al. (2022) en Bella Vista, Corrientes, quienes informan una mayor supervivencia para el clon T-2136 en comparación al clon X-78. Según los autores a los 12 meses de edad, la supervivencia del clon T-2136 fue 15 % mayor respecto del clon X-78.

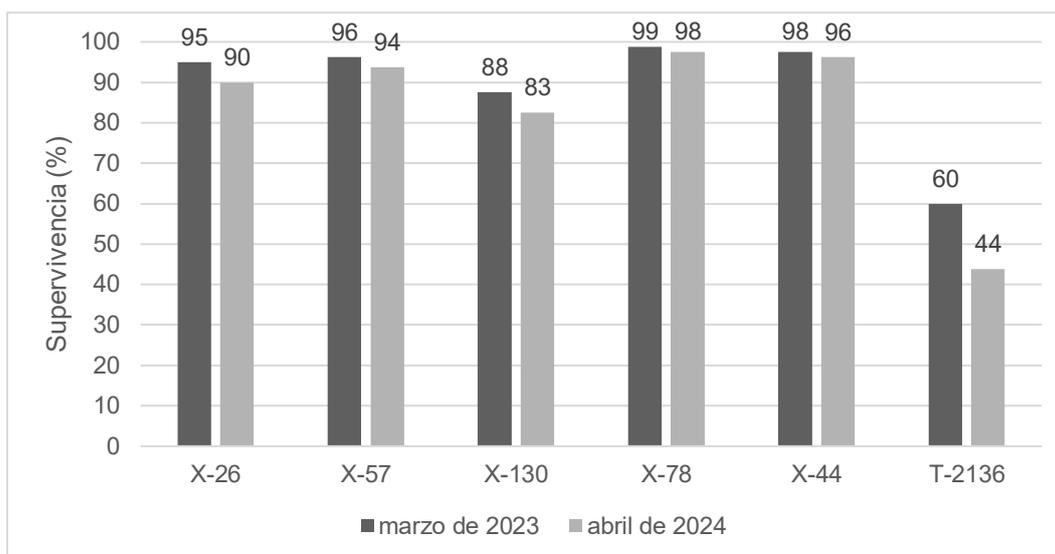


Gráfico 2. Supervivencia por clon a los 5 (marzo de 2023) y 18 meses (abril de 2024) de plantado. Referencias: X-26: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-57: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-130: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-78: *E. grandis* x *E. camaldulensis*; X-44: *E. grandis* x *E. camaldulensis*; T-2136: *E. grandis*

Crecimiento: A los 5 y 18 meses de plantado, se destacaron el X-78 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*), el X-26 (*E. grandis* x *E. urophylla*) y el X-44 (*E. grandis* x *E. camaldulensis*) (Cuadro 3). Los resultados obtenidos permiten identificar diferencias relevantes en el comportamiento inicial de los clones evaluados en estas condiciones. El buen desempeño de los clones con participación genética de *E. camaldulensis* indicaría una buena adaptación al ambiente (edáfico y climático). Con un buen desempeño a los 5 meses y mejor a los 18 meses, se destacó el clon X-26, con participación genética de *E. urophylla*. Esta combinación puede ser muy interesante para esta región, aunque será necesario seguir evaluando. En contraposición, el clon puro de *E. grandis* y el X-130 mostraron los menores crecimientos. La menor respuesta del genotipo puro de *E. grandis* se explica por su baja adaptación a estos ambientes; en contraste a lo sucedido con los clones con aporte genético de *E. camaldulensis* que estarían más adaptados (FAO, 2020; Golfari, 1984).

A los 18 meses de la plantación, la altura y el diámetro a la altura del cuello (DAC) promedio de todas las plantas (considerando todos los clones) fue de 416 cm y 20,2 mm y los clones X-78 y X-26 superaron estos valores medios. Si se toma como referencia la altura promedio del clon de mayor crecimiento (X-26: 100 %) se observa que la reducción del crecimiento siguió el siguiente orden X-78 (20,5 %) < X-57 (27,2 %) < X-44 (28,8 %) < X-130 (41,2 %) < T-2136 (49,6 %).

Cuadro 3. Valores de diámetro a la altura del cuello (DAC) y altura total de los 6 clones en estudio, a los 5 y 18 meses desde la plantación.

Clon	n	5 meses desde la plantación.		18 meses desde la plantación.		
		DAC (mm)	Altura (cm)	n	DAC (cm)	Altura (cm)
T-2136	48	8,35 ± 4 (2-18)	53,71±18,1 (25-92)	35	16,09±4,7 (6-24)	281,8±103 (50-415)
X-44	78	10,71±3,3 (3-22)	90,63±22,1 (35-145)	77	19,86±1,4 (16-23)	398,12±63,2 (250-500)
X-78	79	12,43±3,12 (6-20)	120,29±22,8 (45-175)	78	20,29±1,5 (16-24)	444,42±61,9 (310-570)
X-26	76	11,68±4,5 (3-23)	92,09±28,0 (44-153)	72	25,03±6,8 (5-45)	559,44±118,6 (130-660)
X-57	77	11,9±4,02 (4-22)	75,34±21,6 (35-153)	75	19,94±4,3 (8-28)	407,23±117,7 (110-600)
X-130	70	9,07±3,17 (2-18)	74,77±18,1 (38-127)	66	17,44±2,7 (10-24)	329,08±51,6 (150-420)

n: número de plantas. DAC: diámetro a la altura del cuello, entendido como el diámetro medido en la base del tallo, en el punto de transición tallo-raíz. El valor que sigue a ± corresponde al desvío estándar. Entre paréntesis indican el valor máximo y mínimo de la variable para cada clon en cada fecha. X-26: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-57: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-130: *E. grandis* x *E. urophylla*; X-78: *E. grandis* x *E. camaldulensis*; X-44: *E. grandis* x *E. camaldulensis*; T-2136: *E. grandis*



El estudio realizado por Maggio et al. (2022) en un Entisol (Psamente) localizado en la EEA Bella Vista (Corrientes) muestra, en coincidencia con nuestros registros, que el clon X-78 creció más que el T-2136. Los autores reportan una altura superior, del orden del 24,9 % y 17,4 % en el clon X-78, a los 12 y 24 meses, respecto del clon T-2136. Las diferencias de crecimiento en altura halladas en nuestro estudio entre el clon T-2136 y en X-78 son algo superiores a las reportadas por los autores mencionados. Además, en términos absolutos la altura media de los clones en el sitio de Corrientes a los 12 y 24 meses es mayor a los mismos clones creciendo en el sitio de Bandera. Por otro lado, si se compara la altura registrada en nuestro relevamiento a los 18 meses, con respecto al estudio de López et al. (2024), a los 17 meses, en 4 sitios del NE de Corrientes, se puede observar que: 1) en ambos casos los clones X-78 y X-26 estuvieron mejor posicionados en la comparación con otros clones en relación con el crecimiento; 2) la altura promedio de estos clones en Bandera, Santiago del Estero, fue aproximadamente un 50 % inferior a los de NE de Corrientes. Probablemente las condiciones ambientales (en oferta hídrica) puedan explicar las diferencias.

En síntesis, hasta los 18 meses de la plantación el clon X-78 híbrido de *E. grandis* x *E. camaldulensis*, mostró la mejor combinación de tolerancia a heladas y supervivencia general. El clon T-2136, de *E. grandis* puro resultó el más afectado por las heladas, menor supervivencia y con los menores crecimientos. En cuanto a los híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* se destaca el clon X-26 en crecimiento, aunque se vio afectado por las heladas, sin haber afectado intensamente su supervivencia. Si bien las evaluaciones realizadas no son concluyentes y no habilitan una inferencia estadística, la información obtenida constituye una aproximación inicial para orientar futuros programas de evaluación y selección de materiales genéticos adaptados a la ecorregión del Chaco seco. La continuidad de las mediciones y la incorporación de sitios contrastantes serán claves para validar estas observaciones.

AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Edmundo Ruveda por facilitar las mediciones de crecimiento.

4. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- FAO. 2020. Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en la Argentina. Colección Documentos Técnicos N.º 18. Buenos Aires. DOI.ORG/10.4060/CA8031ES.
- GOLFARI, L. 1984. Zonificación ecológica para reforestación. 22 p. Asociación Argentina de Estudios Forestales, Buenos Aires, Argentina.
- INTA AER BANDERA. 2025. Monitoreo de napas freáticas en el área de Bandera, abril 2025.
- INTA. 2025. Registro climático estación meteorológica Bandera, periodo 2022-2024. Disponible en: <https://siga.inta.gob.ar/#/data>
- LADDAGA, J.E.; MILIONE, G.M. 2019. Evaluación del daño por heladas en clones de *Eucalyptus* en el Centro-Sur de la provincia de Buenos Aires. Nexo Agropecuario 7(2): 11-13. <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/nexoagro/article/view/27545>
- LÓPEZ, J.; LÓPEZ, A.; STAHRINGER, N.I.; DALURZO, H.C. 2024. Evaluación genética del crecimiento inicial de clones puros e híbridos comerciales de *Eucalyptus* en Corrientes, Argentina. XXXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. 4 de octubre de 2024. 5 p.
- MARCÓ, M.; HARRAND, L. 2005. Valor potencial de los Eucaliptos colorados en combinaciones híbridas. I Jornada sobre potencialidad Foresto-Industrial del Eucalipto en Santiago del Estero. Santiago del Estero, 16 y 17 de junio de 2005. 10p. <https://fcf.unse.edu.ar/eventos/1-jornadas-forestales/pdfs/Eucaliptos%20colorados%20en%20combinaciones%20hibridas.pdf>
- POMERA maderas. 2024. Cartilla clones comerciales 2024. 5 p.
- VIZGARRA, L.A.; MAS, L.I. (Eds.). 2023. Cartografía de suelos y evaluación de tierras del sector norte del Departamento Belgrano – Santiago del Estero. Consejo Federal de Inversiones; Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria; Provincia de Santiago del Estero. 102 p.



RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO DE DIFERENTES DENSIDADES DE PLANTACIÓN DEL CLON DE *Eucalyptus grandis* DDT002136

Alejandro Daniel MAGGIO¹; María José IERMANÓ¹; Ramon Marcelo CANTEROS¹; Oscar REY¹; Daniel GOMEZ¹

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue evaluar el rendimiento de cinco densidades de plantación, 3.333 árboles ha⁻¹, 2.000 árboles ha⁻¹, 1.429 árboles ha⁻¹, 1.111 árboles ha⁻¹ y 909 árboles ha⁻¹, del clon *E. grandis* DDT002136 creciendo en las lomas y planicies arenosas de la provincia de Corrientes. El material de estudio se obtuvo de un módulo experimental de densidad de plantación de *E. grandis* establecido en la EEA INTA Bella Vista. Se registró la supervivencia y se determinó la productividad volumétrica a los 84 meses de edad. Para ello, el DAP y la altura (H) de todos los individuos fueron medidos. Seis individuos de cada tratamiento fueron apeados y cubicados. Con los valores de volumen, DAP y H de los individuos apeados fueron ajustados modelos de regresión para estimar el volumen individual de todos los árboles. La densidad de plantación influyó en el desarrollo individual, diferenciándose DAP, H y volumen entre los tratamientos de mayores densidades de plantación (3.333 árboles ha⁻¹, 2.000 árboles ha⁻¹) con respecto a densidades menores (1.429 árboles ha⁻¹, 1.111 árboles ha⁻¹ y 909 árboles ha⁻¹). El clon evaluado presenta un buen potencial de crecimiento, logrando altas tasas de productividad en distintas condiciones de competencia por recursos.

Palabras clave: *silvicultura clonal; volumen; altas densidades de plantación*

1. INTRODUCCIÓN

Corrientes es la principal provincia con plantaciones forestales de la Argentina (CFI, 2018). Las plantaciones clonales de *Eucalyptus* están en constante expansión en la Mesopotamia gracias a la disponibilidad de materiales genéticos adaptables a diversas condiciones edafoclimáticas y al aumento de la productividad (Caniza, 2016). El género *Eucalyptus* ha demostrado su versatilidad para producir una amplia gama de productos, como madera aserrada, postes, celulosa, biomasa, entre otros (Sánchez Acosta, 2006; Griffin, 2014; Moya et al., 2019).

La producción volumétrica de una forestación está influenciada por diferentes factores, como la calidad de sitio, el material genético, las labores silviculturales, las condiciones ambientales, entre otras (Campoe et al., 2016; Martiarena, 2016; Resquín et al., 2022). La densidad de plantación tiene gran relevancia en el desarrollo individual de los árboles, ya que influye en la asignación de carbono en sus compartimentos (Oliveira Lafeté et al., 2012).

Para la provincia de Corrientes es escasa la información sobre la producción de volumen en esquemas de muy altas densidades con *E. grandis* (Fernández y Lupi, 2016; Maggio et al., 2022). El objetivo del trabajo fue evaluar la producción volumétrica en cinco densidades de plantación con el clon *E. grandis* DDT002136 creciendo en las lomas y planicies arenosas de la provincia de Corrientes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en un módulo experimental de densidad de plantación de clones de *E. grandis* establecido en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Bella Vista del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), en junio de 2016.

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



La EEA INTA Bella Vista se ubica a 28° 26' de latitud Sur y 58° 55' de longitud Oeste. El clima es subtropical sin estación seca, con una temperatura media anual de 20°C (Carnevali, 1994). Las precipitaciones medias anuales son de 1256,5 mm. El suelo pertenece al orden Entisol (Paleudalfes psaménticos), arenoso a arenoso franco, sin estructura y con alta susceptibilidad a la erosión hídrica y eólica, baja fertilidad natural y baja retención de humedad (Escobar et al., 1996).

El material genético con el que se estableció el ensayo proviene del programa de mejoramiento genético de la empresa POMERA Maderas. El desempeño del clon *E. grandis* DDT002136 está siendo comparado en un módulo experimental con cinco tratamientos de densidad de plantación: 3.333 árboles ha⁻¹ (2 m × 1,5 m de distancia de plantación), 2.000 árboles ha⁻¹ (2 m × 2,5 m de distancia de plantación), 1.429 árboles ha⁻¹ (2 m × 3,5 m de distancia de plantación), 1.111 árboles ha⁻¹ (2 m × 4,5 m de distancia de plantación) y 909 árboles ha⁻¹ (2 m × 5,5 m de distancia de plantación), en un diseño de bloques completos al azar con 3 repeticiones. Las parcelas se conformaron con 49 árboles (7 filas de 7 árboles), de las cuales se midieron los 25 árboles centrales (5 filas de 5 árboles), a fin de evitar el efecto borde.

El diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) y la altura total (H, m) de todos los individuos fueron medidos a los 84 meses de edad. Se registró la supervivencia. Seis individuos de cada tratamiento fueron apeados. Se procedió a la medición de la altura del árbol y la cubicación del fuste con corteza hasta 3 cm en punta fina según la fórmula de Smalian (Cailliez, 1980).

$$V = ((D1^2 + D2^2)/2) \times (\pi/4) \times L$$

Dónde: V = volumen de la troza con corteza (m³); D1 = diámetro en punta fina (m); D2 = diámetro en punta gruesa (m); L = largo de la troza (m).

Con la sumatoria de los valores de V para cada árbol, se obtuvo el volumen individual. Con los valores de volumen, DAP y H de los individuos apeados fueron ajustados modelos de regresión para estimar el volumen individual de todos los árboles de cada parcela.

$$\ln V = a + b \times \ln DAP + c \times \ln H + \varepsilon$$

Dónde: V = volumen total con corteza (m³); DAP = diámetro a la altura del pecho (cm); H = altura total (m); a, b y c = parámetros del modelo; ln = logaritmo natural; ε = error aleatorio.

Con los volúmenes con corteza estimados en cada tratamiento fueron calculados los valores por hectárea (m³ ha⁻¹).

Se realizó un análisis de varianza con valores críticos al 5 % para determinar la existencia de diferencias significativas entre las densidades de plantación para las variables analizadas. Los análisis se realizaron utilizando el software R Core Team 4.0.3. (R Core Team, 2019).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La supervivencia del clon DDT002136 no registró diferencias significativas (p=0,1845) entre densidades de plantación, siendo del 73,3 ± 25 %, 84,7 ± 6,1 %, 61,3 ± 12,2 %, 76,1 ± 4,1 % y 78,7 ± 16,2 % para los tratamientos de 3.333 árboles ha⁻¹, 2.000 árboles ha⁻¹, 1.429 árboles ha⁻¹, 1.111 árboles ha⁻¹ y 909 árboles ha⁻¹ respectivamente. Las densidades de plantación resultante fueron de 2.443 árboles ha⁻¹, 1.694 árboles ha⁻¹, 876 árboles ha⁻¹, 845 árboles ha⁻¹ y 715 árboles ha⁻¹ respectivamente. Durante los primeros años del establecimiento del módulo experimental ocurrieron eventos meteorológicos extremos (fuertes vientos) que provocaron la caída de árboles en varias parcelas. Se observó, en los árboles caídos, un crecimiento desbalanceado entre los componentes de raíces y copa. Una textura arenosa de suelo favorece el anclaje, debido a la gran cantidad de poros grandes que facilita la penetración y desarrollo del sistema radical. Sin embargo, la alta productividad de estos clones, principalmente de los componentes de copa, provoca un desbalance entre la raíz y copa, haciendo que sean más susceptibles a la caída por fuertes vientos en los periodos iniciales del desarrollo (Maggio et al., 2022). A pesar de ello, se registró un buen establecimiento en todas las densidades con valores similares de supervivencia a los publicados por Aparicio et al. (2018) y Aparicio y Maggio (2018) para



clones y material seminal de *E. grandis* en suelos arenosos de Corrientes. La supervivencia del clon DDT002136 no estuvo relacionada con la densidad de plantación, hasta los 84 meses de edad no se ha registrado mortalidad por cuestiones de ocupación de sitio, coincidiendo con lo observado en Uruguay en distintas densidades de plantación (2.220, 3.330, 4.440 y 6.660 árboles ha^{-1}) con varias especies de *Eucalyptus* (Resquín et al., 2018).

La densidad de plantación influyó en el crecimiento individual de los árboles (Gráfico 1 a, b y c). Se encontraron diferencias significativas para las variables DAP, H y volumen individual entre los tratamientos de mayores densidades de plantación (3.333 árboles ha^{-1} , 2.000 árboles ha^{-1}) con respecto a densidades menores (1.429 árboles ha^{-1} , 1.111 árboles ha^{-1} y 909 árboles ha^{-1}). Estos resultados corresponden con lo afirmado por otros autores (Guerra et al., 2014; Binkley et al., 2017) quienes mencionan que las variables DAP, H y volumen individual tienden a aumentar al disminuir la densidad de plantación, mientras que el volumen total a nivel de hectárea se incrementa a mayores densidades de plantación.

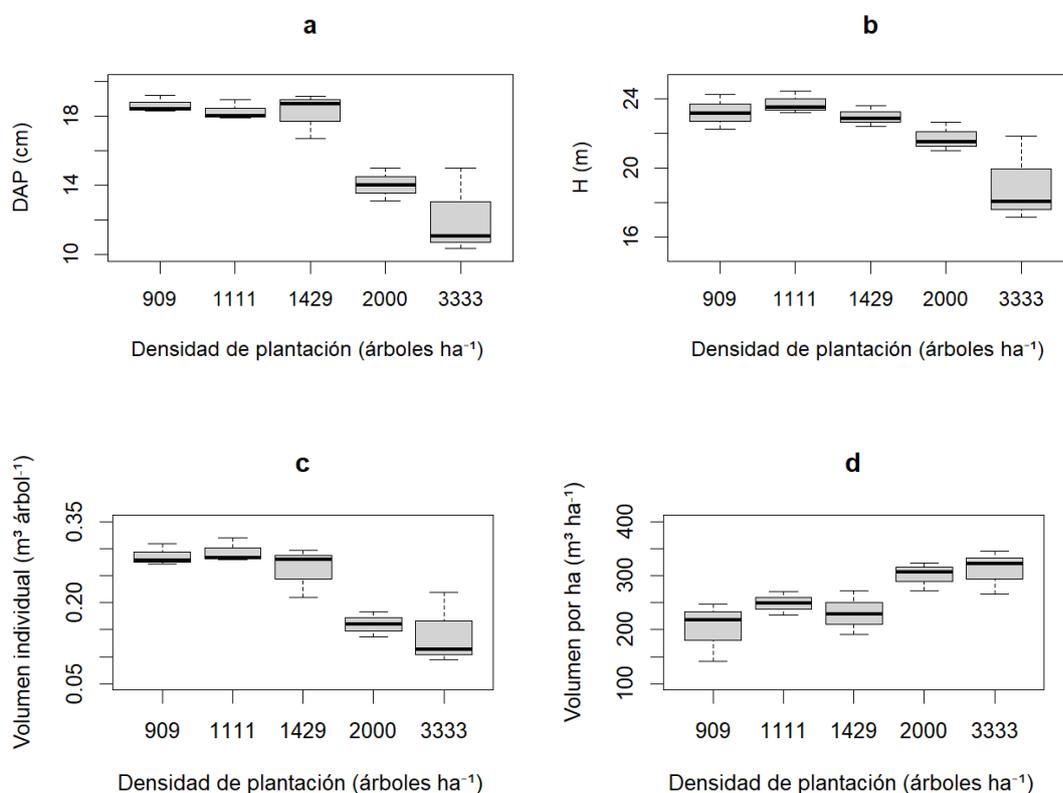


Gráfico 1. DAP, H, volumen individual con corteza ($\text{m}^3 \text{árbol}^{-1}$) y volumen con corteza por hectárea ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$) (gráficos a, b, c y d, respectivamente) de cinco densidades de plantación del clon *E. grandis* DDT002136 evaluados a los 84 meses de edad.

En el Cuadro 1 se presentan los parámetros de los modelos de regresión ajustados para estimar el volumen con corteza por tratamiento. El volumen con corteza por hectárea fue significativamente diferente ($p=0,0276$) entre los tratamientos de mayores densidades de plantación (3.333 árboles ha^{-1} , 2.000 árboles ha^{-1}) con respecto a densidades menores (1.429 árboles ha^{-1} , 1.111 árboles ha^{-1} y 909 árboles ha^{-1}) (Gráfico 1 d). En estos ambientes de baja fertilidad natural de la provincia de Corrientes el clon evaluado registró buenos rendimientos independientemente de la densidad de plantación. La producción de volumen por hectárea resultó superior (15 % - 30 %) a las registradas para la región (Aparicio, 2012; Caniza et al., 2018), aunque estos estudios difieren en el material genético analizado y la densidad de plantación (416 - 1.000 árboles ha^{-1}). Esto señala que el clon evaluado muestra un buen potencial de crecimiento y altas tasas de productividad como resultado del grado de mejora



genética, en distintas condiciones de competencia por recursos.

Cuadro 1. Parámetros y estadísticos de los modelos de regresión ajustados para las estimaciones de volumen por densidad de plantación. Los coeficientes a, b, c representan los parámetros de los modelos de regresión. R²: coeficiente de determinación, e: error estándar de la estimación.

Densidad de plantación (árboles ha ⁻¹)	a	b	c	R ²	e
3.333	-9,856	1,851	1,007	99,58	0,066
2.000	-9,841	2,268	0,631	99,61	0,095
1.429	-9,764	1,830	0,986	99,54	0,083
1.111	-9,579	1,233	1,503	99,41	0,133
909	-9,707	1,469	1,321	99,78	0,066

4. CONCLUSIONES

El clon *E. grandis* DDT002136 registró buenos crecimientos en las lomas y planicies arenosas de la provincia de Corrientes, independientemente de la densidad de plantación. Esta influyó en el desarrollo individual y en la producción volumétrica por hectárea diferenciándose entre los tratamientos de mayores densidades de plantación (3.333 árboles ha⁻¹, 2.000 árboles ha⁻¹) con respecto a densidades menores (1.429 árboles ha⁻¹, 1.111 árboles ha⁻¹ y 909 árboles ha⁻¹). Las altas tasas de productividad logradas por el clon estudiado permiten concluir que tiene un buen potencial de crecimiento en distintas condiciones de competencia por recursos.

5. LITERATURA CITADA

- APARICIO, J.L. 2012. Comportamiento de clones de *Eucalyptus grandis* en relación a un material de semilla en un suelo arenoso de Corrientes. XXVI Jornadas forestales de Entre Ríos.
- APARICIO, J.L.; MAGGIO, A.; FRAGUEIRO, L. 2018. Control de malezas de *Eucalyptus grandis*. Respuestas a diferentes anchos de control. XXXII Jornadas forestales de 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, 93-121.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R.; CEGATTA, I.; STAPE, J.L. 2017. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal *Eucalyptus* plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management* 405: 271–283.
- CAILLIEZ, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. Vol. 1 - estimación del volumen. Estudio FAO 22/1.
- CANIZA, F. 2016. Silvicultura clonal del *Eucalyptus grandis* en la Mesopotamia Argentina. *Revista Chacra*. Recuperado de <https://www.revistachacra.com.ar/nota/silvicultura-en-la-mesopotamia-argentina/>
- CANIZA, F.J.; GARCIA, M.; APARICIO, J.L.; DE LA PEÑA, C.; MASTRANDREA, C.; FLORES PALENZONA, M.; BARRIOS, M.F.; MARTINEZ, M. 2018. Avances del INTA en la silvicultura clonal de *Eucalyptus grandis* en la Mesopotamia argentina. XXXII Jornadas forestales de Entre Ríos.
- CAMPOE, C.O.; MUNHOZ, J.S.B.; ALVARES, C.A.; CARNEIRO, R.L.; DE MATTOS, E.M.; FERREZ, A.P.C.; STAPE, J. 2016. Meteorological seasonality affecting the growth of individual trees in forest plantations in Brazil. *Forest Ecology and Management* 380: 149-160.
- CARNEVALI, R. 1994. Fitogeografía de la Provincia de Corrientes: Cartas, escalas 1:500.000 y 1:1.000.000. Gobierno de la Provincia de Corrientes. INTA. Corrientes.
- 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 1:500000. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales. EEA Corrientes. 432 pp.



- FERNANDEZ, R.; LUPI, A.M. 2016. Potencial de desarrollo de plantaciones dendroenergéticas en Argentina. Ediciones INTA. 207 p.
- GRIFFIN, A.R. 2014. ¿Clones or improved seedlings of *Eucalyptus*? Not a simple choice. *International Forestry Review* 16 (2): 216-224.
- GUERRA, S.P.; GARCIA, E.A.; LANCAS, K.P.; REZENDE, M.A.; SPINELLI, R. 2014. Heating value of eucalypt wood grown on SRC for energy production. *Fuel* 137: 360-368.
- MAGGIO, A.D.; CANIZA, F.J.; CELLINI, J.M; MARTINEZ-MEIER, A. 2022. Potencial dendroenergético de dos clones de *Eucalyptus* sp. en Corrientes, Argentina. *Madera y Bosques* 28 (1), e2812268.
- MARTIARENA, R. 2016. Efecto de la disponibilidad de recursos sobre la eficiencia de uso y conservación de los nutrientes en función de las condiciones edafoclimáticas, edad y manejo de las plantaciones de *Pinus taeda* L. en la Mesopotamia Argentina. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata].
- MOYA, R.; TENORIO, C.; OPORTO, G. 2019. Short rotation wood crops in Latin American: A review on status and potential uses as biofuel. *Energies* 12(4), 705.
- OLIVEIRA LAFETÁ, B.; CAMPOS SANTANA, R.; SARAIVA NOGUEIRA, G.; ANDRADE PENIDO, T.M.; COUTO, L. 2012. Area foliar específica y e clorofila em eucalipto estimadas por redes neurais artificiais. *Biomassa & Energia* 5 (1): 67-75.
- R CORE TEAM. 2019. R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria.
- RESQUÍN, F.; NAVARRO-CERRILLO, R.M.; RACHID-CASNATI, C.; HIRIGOYEN, A.; CARRASCO-LETELIER, L.; DUQUE-LAZO, J. 2018. Allometry, Growth and Survival of Three *Eucalyptus* Species (*Eucalyptus benthamii* Maiden and Cambage, *E. dunnii* Maiden and *E. grandis* Hill ex Maiden) in High-Density Plantations in Uruguay. *Forests* 9 (12), 745.
- RESQUÍN, F.; BENTANCOR, L.; CARRASCO-LETELIER, L.; RACHID-CASNATI, C.; NAVARRO-CERRILLO, R.M. 2022. Rotation length of intensive *Eucalyptus* plantations: How it impacts on productive and energy sustainability. *Biomass and Bioenergy* 166, 106607.
- SANCHEZ ACOSTA, M. 2006. Productos sólidos a partir de madera de eucaliptos cultivados. *Boletín Informativo CIDEU* (2): 103-117.



POTENCIAL PRODUCTIVO DE CLONES DE EUCALIPTOS EN LA ZONA CENTRO-SUR DE SANTA FE

Leonel HARRAND¹; Francisco CARDOZO²; Carla S. SALTO¹; G.P. Javier OBERSCHHELP¹

RESUMEN

Actualmente, la provincia de Santa Fe posee un escaso desarrollo en plantaciones forestales. Los diferentes materiales de *Eucalyptus* pueden proveer madera aserrable, como también cubrir otras demandas de productos. Se implantó un ensayo de clones de *Eucalyptus* para evaluar adaptación y crecimiento en la zona de Oliveros. Con un diseño de parcelas lineales de 4 plantas y 4 repeticiones en bloques, se analizó el crecimiento en diámetro, altura y volumen hasta el 9º año de 46 materiales diferentes de eucaliptos puros e híbridos. Los mejores crecimientos al 9º año se presentaron en los materiales *E. grandis* x *E. camaldulensis*. Al 9º año, el clon más productivo (GC-96) rindió 402 m³/ha de madera, mientras que el material de semilla de *E. dunnii* 350 m³/ha y los materiales de *E. camaldulensis* no sobrevivieron. Se concluye que es promisorio la realización de forestaciones con clones de eucaliptos en la región centro-sur de Santa Fe y que los clones de *E. grandis* x *E. camaldulensis* presentan un alto potencial de crecimiento.

Palabras clave: *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus híbrido*, *sobrevivencia*

1. INTRODUCCIÓN

La provincia de Santa Fe, actualmente, posee un escaso desarrollo en plantaciones forestales, contando con 8.800 ha forestadas, principalmente con especies de eucaliptos (SAGPyA, 2024). Para establecer plantaciones rentables, es necesaria una selección de especies adecuadas a los sitios donde se plantará y a los objetivos de producción. La correcta elección del material a utilizar posibilita la obtención de árboles con elevada sobrevivencia, de rectitud y crecimiento óptimo, y de menor susceptibilidad a plagas y enfermedades. La utilización de clones como estrategia de forestación, planea aprovechar la homogeneidad genética que esto implica, como ventaja productiva y de adaptación. Los clones híbridos interespecíficos de eucaliptos son generados en busca de reunir en una sola planta características deseables como: rectitud, densidad de madera, crecimiento, tolerancia a heladas, plagas y enfermedades, etc. (Harrand, 2005). El programa de mejoramiento genético de eucaliptos de INTA viene seleccionando y clonando materiales superiores de especies puras y de híbridos interespecíficos como *E. grandis* x *E. camaldulensis* y *E. grandis* x *E. tereticornis*, entre otros (Harrand et al., 2016). Los diferentes materiales de *Eucalyptus* pueden proveer madera aserrable (Martínez, 2022), como también cubrir otras demandas de productos: postes, usos energéticos o producción de carbón (Gauna et al., 2022; Maggio et al., 2022), e inclusive considerarse como reservorios de carbono (FAO, 2024). El objetivo del presente trabajo es evaluar la adaptación y crecimiento alcanzado por diferentes materiales clonales de eucaliptos hasta los 9 años de implantado en un sitio de la zona centro-sur de la provincia de Santa Fe.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo de clones de eucaliptos fue instalado en la EEA Oliveros (Santa Fe – 32° 33' 44" S – 60° 52' 00" O) el 22/10/2015. En el ensayo se incluyeron 28 clones híbridos *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* (GC), 3 clones *E. grandis* x *E. tereticornis* (GT), 2 clones *E. grandis* x *E. robusta* (GR), 1 clon *E. camaldulensis* (EC), 7 clones *E. grandis* (EG), y material de semilla de *E. grandis* (HSP INTA Concordia), *E. dunnii* (ED, HSP INTA Castelar), *E. camaldulensis* (EC_FA, HSC INTA Famaillá, y

¹ INTA EEA Concordia, Ruta 22 y vías FFCC, Estación Yuquerí, Concordia (Entre Ríos). harrand.leonel@inta.gob.ar

² INTA AER Totoras, Santa Fe. cardozo.francisco@inta.gob.ar



EC_PE, Semilla origen Petford) y *E. tereticornis* (ET, HSP INTA Castelar), como testigos de ensayo (un total de 46 tratamientos). Todos los clones evaluados corresponden a materiales generados dentro del programa de mejoramiento genético de eucaliptos de INTA.

El lote para la realización del ensayo provenía de un cultivo de soja y se efectuó una labor de preparación de todo el terreno con arado de disco y rastra de dientes. Luego de la plantación se efectuó un riego de asiento. Según carta de suelo, el lote en el que se localiza el ensayo corresponde a la Serie Maciel, que se ubican en loma y media loma y cuya capacidad de uso es clase I y II.

El diseño del ensayo corresponde a Bloques Completamente Aleatorizados (4 bloques), con parcelas lineales de 4 plantas. Rodeando al ensayo se estableció una bordura con plantas de ED. El distanciamiento de plantación fue de 3 m x 3 m.

En cuanto a las condiciones climáticas durante el período de estudio (2015-2024), las precipitaciones promedio fueron de 877 mm/año, con un mínimo de 423 mm (2023) y máximo de 1296 mm (2016). Las temperaturas en este mismo período registraron una máxima de 42,9 °C (2022), una mínima absoluta de -6,9 °C (2016) y un promedio anual de 28 días con heladas agrometeorológicas (datos del observatorio meteorológico de la EEA Oliveros).

Para evaluar la respuesta de los diferentes materiales, se realizó una primera medición inicial de altura a los 7 meses de implantado, y luego, a los 7 años (septiembre 2022) y 9 años (noviembre 2024) una medición de diámetro normal (DN) y altura total (ALT) de todas las plantas sobrevivientes. Con los valores de DN y ALT se calculó el volumen individual total (VOL, en m³) utilizando la fórmula de Fassola et al. (2007). Para la evaluación de los diferentes clones y la estimación de sus valores genotípicos, con la metodología de modelos mixtos, se utilizó el Software Selegen-Reml/Blup (Resende, 2007); dada la heterogeneidad espacial generada por las pérdidas de plantas, se realizó un análisis de utilizando el Modelo 127 que considera la utilización de una covariable, la que se definió como la suma del área basal de los árboles presentes circundantes a cada ejemplar. En la última evaluación, también se realizó una calificación de rectitud de las plantas, en una escala de 1 a 8 (8= planta recta) y un registro de presencia de deformación en el fuste por heladas, como bifurcaciones o desviaciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sobrevivencia: la implantación del ensayo y de los diferentes materiales evaluados se puede calificar como muy buena, con una sobrevivencia general del 97 %, siendo el tratamiento con menos plantas el material de semilla de *E. camaldulensis* origen Petford (81,25 %). Hasta los 7 años, la sobrevivencia en general continuó siendo buena, con un promedio de 94 % de plantas vivas, estando los dos materiales de *E. camaldulensis* de semilla con el menor valor (75 %).

Sin embargo, a los 9 años la sobrevivencia se vio fuertemente afectada en algunos materiales. Los 3 materiales de *E. camaldulensis* disminuyeron a 38 % (EC_Fa) y 25 % (EC-4 y EC_PE), y el clon GC-24 murió en su totalidad. También el clon GC-135 mostró problemas fisiológicos en este período, sin llegar a morir completamente las plantas, pero si mostrando $\frac{3}{4}$ partes de su fuste seco y brotando en la porción inferior. El estrés hídrico presentado en ese período, con altas temperaturas y escasas precipitaciones, junto al poco desarrollo que presentaban las plantas de estos genotipos, probablemente haya sido la causa de la alta mortandad.

Atanasio et al. (2024a) obtienen sobrevivencias de materiales clonales de eucalipto de 75 % a 100 %, para la región de Sáenz Peña, Chaco. Fornés et al. (2023) para la Llanura Deprimida Salina (Leales, Tucumán) mencionan sobrevivencias variables para diferentes materiales clonales con valores entre 17 % y 83 %, pero con muerte total de todos los materiales EG en esas condiciones edáficas. Para la región de Marcos Juárez (Córdoba), Marraro Acuña et al. (2024) mencionan sobrevivencias de entre 29 % a 83 % para algunos materiales de eucaliptos.

Daño por heladas: no se realizó un seguimiento inicial del daño por helada en el ensayo, pero en la última recorrida realizada, se contabilizaron las plantas con daños marcados a diferentes alturas del fuste (principalmente ocurridas en los primeros años de crecimiento) como bifurcaciones o



desviaciones. Todos los materiales mostraron alguna proporción de plantas afectadas. Con menos del 30 % de las plantas afectadas, junto con ED, algunos de los clones fueron EG-36, GC-9, GC-122 y GC-125; mientras que algunos clones como GC-96, GC-117 o GR-74 presentaron el 100 % de afectación.

Vale aclarar que por el momento en el que se realizó esta evaluación, pueden haberse no contabilizado algunos árboles que sí hubieran presentado daños, pero no se observaron con la edad. En el mismo sentido, se observó que muchas de las plantas que presentaban poco crecimiento a los 9 años, mostraban signos de ser rebrotes desde la base, signo claro de muerte total del tejido aéreo en el comienzo del crecimiento. Particularmente algunos clones EG (como EG-157) presentaron una alta frecuencia de este daño.

Crecimiento: se observaron respuestas particulares según los diferentes materiales genéticos.

El crecimiento inicial en altura a los 7 meses fue variable según los grupos genéticos. Los materiales EG promediaron 0,9 m, ED y GR presentaron un promedio de 1,1 m, 1,3 m para los clones GT, 1,4 m para ET, 1,5 m para EC, y los clones GC rondaron entre 1,1 m (GC-119) hasta 1,8 m (GC-24 y GC-27).

Los tres tratamientos EC mostraron una mala respuesta a este sitio de plantación, con diámetros promedio que no superaron los 8,5 cm a los 7 años, y alturas promedio de 10 m o menos (Gráfico 1). El material de ET mostró un comportamiento levemente superior a EC. Cabe mencionar que los *E. camaldulensis* aquí evaluados corresponden a variedades de la distribución norte de la especie (subtropicales); probablemente variedades de distribución de más al sur muestren un mejor comportamiento en esta zona.

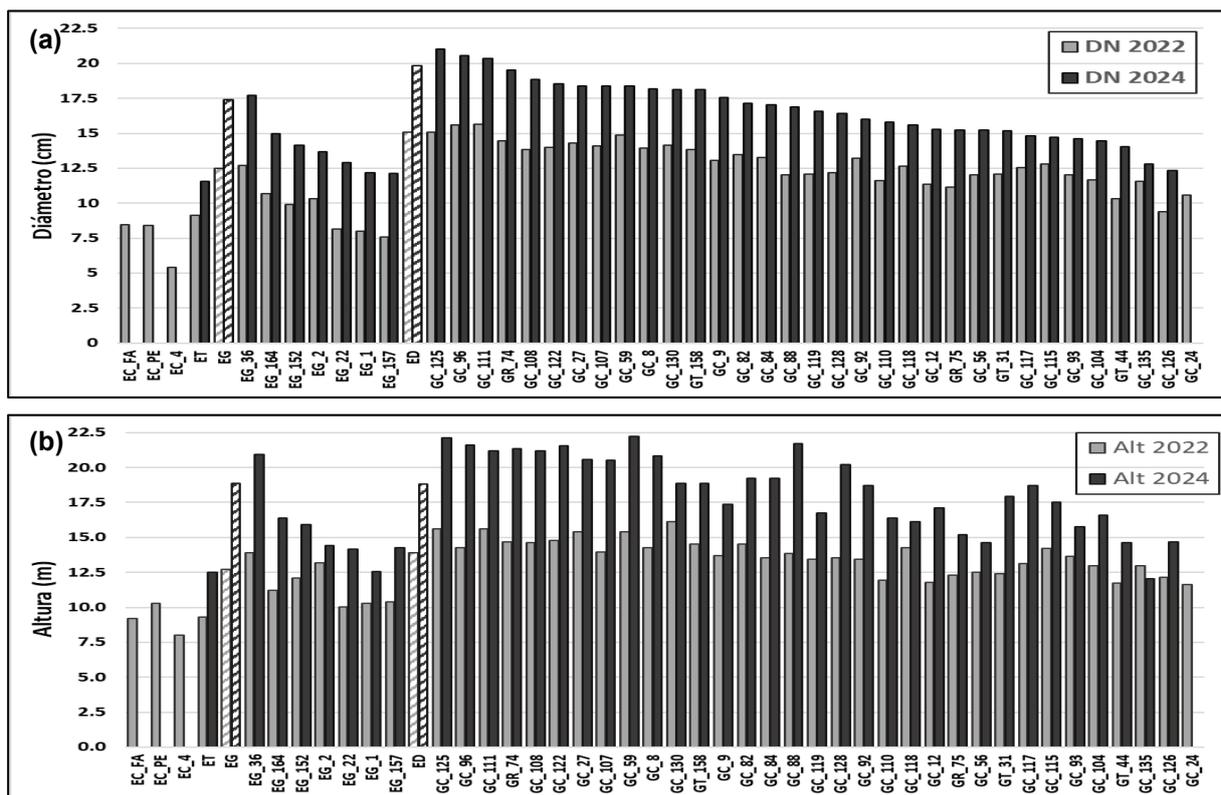


Gráfico 1. Crecimiento individual promedio (valores genotípicos estimados), a los 7 y 9 años, en un ensayo de clones de *Eucalyptus* en Oliveros (Santa Fe), instalado en octubre de 2015. a) Diámetro normal, b) Altura total.

Dentro de los tratamientos de *E. grandis*, el material de semilla junto con el clon EG-36, mostraron un buen crecimiento con diámetro promedio de 17,5 cm y alturas totales de alrededor de 20 m, a los 9 años. Los otros clones EG evaluados, mostraron valores inferiores en grado variable, según su susceptibilidad al frío, lo que afectó su crecimiento inicial. A igual edad, las plantas de *E. dunnii* mostraron un buen crecimiento, con valores de diámetro promedio de 19,8 cm y alturas de 18,8 m.



Los clones híbridos mostraron respuestas variables, con algunos materiales con mucho potencial de crecimiento para la región, con valores de diámetro y altura promedios superiores al material de *E. dunnii* (como GC-96, GC-125 y GC-111) (Gráfico 1).

Considerando la rectitud de las plantas, se destacan los clones GC-125, GR-75, GC-122 y GT-158 (promedio 7,1; 6,4; 6,1 y 5,6; respectivamente, siendo 8 el mejor valor). Los materiales EG presentaron en promedio 5,1 y ED promedió 4,8. Por el otro lado, ET presentó muy mala rectitud, con un promedio de 2,3 y los clones GC-96 y GC-135, con promedios de 2,5 y 2,2 respectivamente.

Combinando ambas características (crecimiento y rectitud) podemos mencionar como clones superiores en este sitio: GC-125, GC-111, GC-108, GC-122, GC-130, GR-74 y GT-158 (Gráfico 2a).

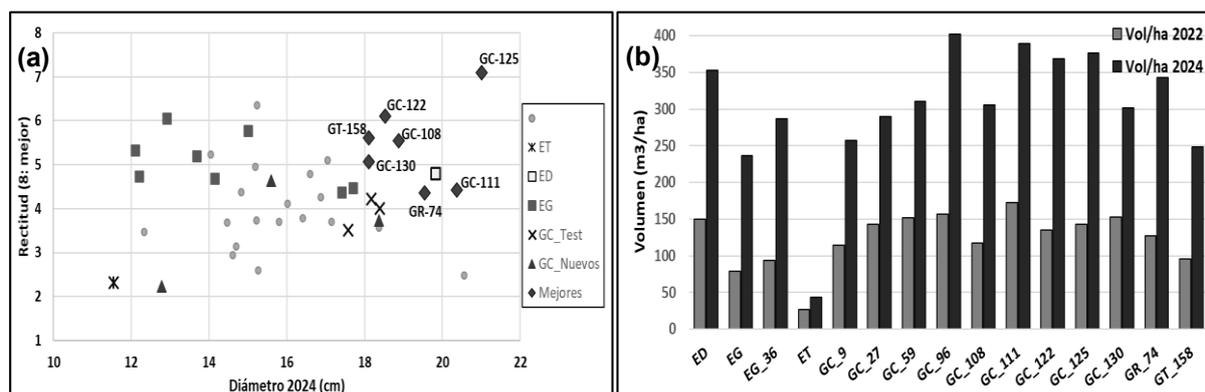


Gráfico 2. Ensayo de clones de eucaliptos y material de semilla, plantado en Oliveros (Santa Fe), en octubre de 2015. a) Respuesta en crecimiento (DN) y Rectitud de fuste (escala de 1 a 8=mejor) a los 9 años. b) Respuesta en crecimiento (volumen total, m³/ha) de algunos de los materiales, a los 7 y 9 años.

Considerando la sobrevivencia mostrada, el crecimiento exhibido a los 9 años de los mejores clones, ronda entre 250 y 400 m³/ha de volumen total (Gráfico 2b). Asimismo, ED presenta un crecimiento de 353 m³/ha; estos valores son comparables al crecimiento que se presenta en regiones típicamente forestales como lo es la costa este de Entre Ríos.

Souza et al. (2023) mencionan alturas entre 3 m y 4,5 m para algunos materiales de eucalipto al año de implantado en San Agustín (Santa Fe). Marraro Acuña et al. (2024) mencionan al clon GC-8 como el mejor en su ensayo en Córdoba, con un crecimiento en DN de 11 cm y ALT de 9 m, con 37 meses de plantado. Harrant et al. (2022) mencionan valores de crecimiento volumétrico de 0,9 m³ para *E. grandis* de semilla para un sitio de buenas características edáficas a los 12 años de implantado, lo que equivale a 425 m³/ha de madera. En Concepción del Uruguay (Entre Ríos) se mencionan valores de volumen individual al 6º año de 167, 198 y 217 dm³ para los clones GC-8, GC-9 y GC27; 210 dm³ para el clon GT-31 y de 185 y 204 dm³ para los clones EG-157 y EG-36 (López et al., 2016). A los 8 años, en Resistencia (Chaco) el mejor clon del ensayo (GC-118) rinde el equivalente a 308 m³/ha de madera, mientras que el clon EG-36 solamente 67 m³/ha (Atanasio et al., 2024b).

4. CONCLUSIONES

La plantación de algunos materiales genéticos (clones o semilla) de eucaliptos es factible de realizar en la región centro-sur de Santa Fe, con rendimientos maderables promisorios. Los clones experimentales GC-111, GC-122 y GC-125 presentan un muy buen crecimiento en la zona con alto potencial de utilización en forestaciones; los clones comerciales GC-27 y GC-59, también mostraron un crecimiento aceptable, junto con el clon EG-36. Igualmente *E. dunnii* muestra un muy buen comportamiento, por lo que lo ubica como un material a considerar en estas forestaciones.

Es necesario continuar con este tipo de evaluaciones en otros sitios de la región, tanto con estos materiales como con la incorporación de otros nuevos. El material por utilizar debe considerar el uso que se dará a lo producido: la madera de los diferentes materiales (especies o híbridos) posee distintas cualidades, por lo que su utilización en diversos usos (madera aserrada, celulosa, energía) puede ser más o menos favorable.



5. LITERATURA CITADA

- ATANASIO, M.A.; PERNOCHI, L.A.S.; HARRAND, L. 2024a. Clones de eucaliptos en la región de Sáenz Peña, Chaco. Parte 1: Respuesta a las heladas. XXXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos.
- ATANASIO, M.A.; PERNOCHI, L.A.S.; HARRAND, L. 2024b. Clones de eucaliptos en la región de Sáenz Peña, Chaco. Parte 2: comportamiento de las variables dasométricas. XXXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos.
- GAUNA, J.M.; RAFFAELI, N.; TONELLO, M.L.; HARRAND, L.; MASTRANDREA, C.A.; MARTÍNEZ, M.S.; OBERSCHELP, G.P.J.; BAROTTO A.J. 2022. Potencial de especies, clones puros e híbridos de eucaliptos para elaboración de carbón vegetal. XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Octubre 2022. Entre Ríos, Argentina.
- FAO. 2024. Cifras para la sostenibilidad – Los productos forestales en la FAO. Roma. <https://doi.org/10.4060/cc7561es>
- FASSOLA, H.E.; CRECHI, E.H.; KELLER, A.E.; BARTH, S.R.; FERNANDEZ, T.E. 2007. 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*. Informe técnico n° 61. INTA EEA Montecarlo. 103 p.
- FORNÉS, L.; SARAVIA, P.; ANGUEIRA, S.P.; FEYLING MONTERO, M.; HARRAND, L. 2023. Determinación de umbrales edáficos para la implantación de clones de especies e híbridos de *Eucalyptus* en la llanura deprimida salina, Tucumán-Argentina. En: VIII Congreso Forestal Latinoamericano - V Congreso Forestal Argentino. 27 al 30/03/2023. Mendoza, Argentina. pp. 729-731
- HARRAND, L. 2005. La utilización de híbridos interespecíficos como alternativa forestal. IDIA XXI. Año V. N°8: 171-174.
- HARRAND, L.; OBERSCHELP, G.P.J.; SALTO, C.S. 2022. Productividad de materiales comerciales de *Eucalyptus grandis* en Entre Ríos, Argentina. XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Octubre 2022.
- HARRAND, L.; OBERSCHELP, J.; SALTO, C.; MARCÓ, M.; LÓPEZ, J.A. 2016. Ensayos clonales de especies e híbridos de *Eucalyptus*. Domesticación y Mejoramiento de Especies Forestales. ISBN 978-897.1873-40-1:61-62.
- LÓPEZ, J.A.; HARRAND, L.; MARCÓ, M.A.; LÓPEZ, A.J. 2016. Variación genética de clones híbridos de *Eucalyptus*. Quebracho (Santiago del Estero) 24(1): 5-6. Recuperado en 06 de agosto de 2024, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48163556005>
- MAGGIO, A.D.; CANIZA, F.J.; CELLINI, J.M.L.; MARTINEZ-MEIER, A. 2022. Potencial dendroenergético de dos clones de *Eucalyptus* sp. en Corrientes, Argentina. Madera y bosques 28(1), e2812268. Epub 05 de septiembre de 2022. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812268>
- MARRARO ACUÑA, F.; CORA, A., HARRAND, L.; CHIACCIERA, S. 2024. Evaluación de especies y clones de eucaliptos en suelos agrícolas de la provincia de Córdoba – Argentina. XXXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos.
- MARTÍNEZ, M.S. 2022. Caracterización tecnológica de clones de eucalipto. Tesis. Universidad Nacional de Misiones, Área en Ciencias Forestales, Orientación en Silvicultura y Manejo Forestal. 118p.
- SAGPyA. 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> (fecha de consulta: 07/10/2025)
- RESENDE, M.D.V. de. 2007. Software SELEGEN-REML/BLUP: sistema estadístico e seleção genética computadorizada via modelos lineares mistos. Embrapa Florestas. 359 p.
- SOUZA, J.C.A.V. de, ACETTA, P.M.; GROSSO, P.; CEAGLIO, D.; WEIS, G.; CAMPERI, J.; MOSCATELLI, L.; CÓRDOBA, M.; BENDER, A.; LUNA, J.P.; DÍAZ LEZCANO, M.; CARDOZO, F. 2023. Evaluación de la implantación de distintos materiales genéticos de eucaliptos en suelos halomórficos. VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino, Ciudad de Mendoza, 27 al 30 de marzo de 2023, p. 760-762.



PRESENTACIÓN DE NUEVOS SAUCES MEJORADOS PARA PRODUCCIÓN MADERERA RECIENTEMENTE INSCRIPTOS EN EL INASE

Teresa CERRILLO¹; Jorgelina GRANDE²; Esteban THOMAS³

RESUMEN

Se presenta una breve caracterización de cuatro clones mejorados de sauce (*Salix* spp.) recientemente logrados por INTA e inscriptos en el INASE en agosto de 2025. Dos de ellos, Pampero INTA y Tango INTA, tienen origen en el cruzamiento *Salix matsudana* Koidz. x *Salix alba* L., mientras que Bravo INTA y Brazo Largo INTA fueron obtenidos por polinización abierta de individuos de *Salix matsudana* Koidz. y *Salix nigra* Marshall, respectivamente. La selección consideró como principales criterios: el crecimiento, la adaptación, la resistencia/tolerancia a enfermedades, la forma y la aptitud tecnológica de la madera. Estos cuatro clones mostraron muy buena aptitud para aserrado; tres de ellos se destacaron en función de la calidad de la madera para elaborar papel para embalaje y diarios. En cuanto a la adaptabilidad se observaron atributos de interés para la producción, variables según el clon, como tolerancia al exceso de humedad, alto contenido de sales y rusticidad en sitios más altos o con alternancias hídricas. La disponibilidad de estos nuevos clones mejorados se suma a los ocho que fueron registrados entre 2013 y 2022.

Palabras clave: *Salix*, mejoramiento genético, cultivares, foresto-industria

1. INTRODUCCIÓN

Los sauces (*Salix* spp.) son especies pioneras, caracterizadas por crecer bien en regiones húmedas, poco adecuadas para el cultivo de otras especies productoras de biomasa (Rotherham, 2022). A lo largo de la historia, estas especies vienen demostrando utilidad para el ser humano, aplicándose actualmente para diversos fines económicos, como la producción de madera para aserrado, papel y bioenergía en sistemas de corta rotación a altas densidades (Skinner, 2022). A estos usos se agregan otras aplicaciones como el control de la erosión, la restauración de ecosistemas, producción de forraje y la fitorremediación (Isebrands y Richardson, 2014), permitiendo la dualidad de prestaciones productivas y ambientales al utilizar un mismo material forestal. En Argentina, la aplicación del sauce es casi exclusivamente para industrias de pulpa para papel y paneles de partículas, las cuales consumen aproximadamente un 90 % de la producción (Borodowski, 2017); en segundo lugar, se utilizan para aserrado, para lo cual el sauce es apto (Atencia, 2010). Es el principal insumo forestal que utiliza Papel Prensa S.A. para elaborar papel para diarios y, más recientemente papel para embalaje, constituyendo un precedente en el mundo (Grande, 2022). Este destino consume más del 60 % de los sauces producidos en el delta del Paraná, zona núcleo de cultivo de este género forestal en el país.

A lo largo de décadas, el sauce 'Soveny Americano' (*Salix babylonica* var. *sacramento*, introducido al país en 1928) ha sido el clon más valorado para la industria celulósica por sus estándares destacados, que están determinados por diversas variables, como la longitud de la fibra de madera y resistencias, siendo la resistencia al desgarro el factor clave. La integración de rasgos forestales e industriales deseables en un mismo material genético ha sido un objetivo importante para mejorar el estándar de las plantaciones de sauces para diversas aplicaciones, incluyendo madera para aserrado y usos en servicios ambientales. El INTA desarrolla desde hace más de dos décadas un programa de mejoramiento para este género forestal que ha dado lugar a una serie de ocho cultivares. Seis de los

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

² Laboratorio Central, Planta San Pedro, Papel Prensa. San Pedro – Buenos Aires

³ EEA Alto Valle. INTA, Río Negro



clones de esa primera serie (Carapachay INTA CIEF, Géminis INTA CIEF, Lezama INTA CIEF, Los Arroyos INTA CIEF, Yaguareté INTA CIEF y Tehuelche INTA) fueron validados en 2024 en el proceso industrial real para elaborar papel, con resultados equivalentes al Soveny Americano. Integrando la aptitud demostrada para lograr tablas y tableros alistonados (en aserradero Eterra S.A.), sumado al potencial para otras aplicaciones, como la fitorremediación (Romagnoli et al., 2022) estos materiales ofrecen un perfil multipropósito (Cerrillo et al., 2022).

En el presente trabajo se presenta una breve caracterización de los cuatro nuevos clones seleccionados. Son clones con un perfil forestal y de aplicación similar a la serie anterior, que permitirá ampliar la diversidad genética en el material disponible para plantación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los cuatro clones recientemente inscriptos fueron obtenidos a partir de cruzamientos controlados y polinizaciones libres, seguidos de sucesivas etapas de evaluación en ensayos a campo, llevados a cabo principalmente en el delta del Paraná y en menor escala en los valles irrigados de Patagonia Norte (Cerrillo et al., 2022). La población de mejora que dio lugar a la presente selección comprendió inicialmente veintiocho (28) genotipos experimentales que fueron evaluados de acuerdo con criterios preestablecidos: crecimiento, adaptación al ambiente, forma del fuste, resistencia/tolerancia a las principales enfermedades y propiedades de la madera con relación a las industrias del papel y del aserrado. Luego de un screening, la selección final se centró en los 20 mejores genotipos. Todos fueron comparados con los testigos tradicionales y los inscriptos entre 2013 y 2022 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Material genético del Programa de Mejoramiento Genético de Sauces de INTA en fase final de selección (en negrita y subrayado: los nuevos selectos a los que refiere el presente trabajo).

Clones	Código/nombre de genotipos	Especies parentales		Status	
		Madre	Padre		
Experimentales	94.08.03 - 94.08.43 - 94.08.74 - 94.08.94				
	95.12.06 - 96.01.12 - 98.07.19 - 98.07.27	<i>S. matsudana</i> Koidtz.	<i>S. alba</i> L.		
	98.07.57 - 98.07.71 - 98.10.07 - 98.11.01				
	95.07.11	<i>S. matsudana</i> Koidtz.	?		
	C-30-12	<i>S. nigra</i> Marshall.	?		
	C-14-12	<i>S. matsudana</i> Koidtz.	?		
	98.13.03 - 98.13.06	<i>S. matsudana</i> Koidtz.	<i>S. nigra</i> Marshall.		
	97.24.02 - 97.24.05 - 97.24.07	<i>S. amygdaloides</i> Andersson	?		
	Inscriptos	Géminis INTA CIEF	<i>S. matsudana</i>	polinización abierta	Inscriptos en 2013
		Los Arroyos INTA CIEF	<i>S. matsudana</i>	<i>S. alba</i>	
Lezama INTA CIEF		<i>S. matsudana</i>	<i>S. nigra</i>		
Yaguareté INTA CIEF		<i>S. alba</i>	polinización abierta		
Carapachay INTA CIEF		<i>S. matsudana</i>	<i>S. alba</i>	Inscripto en 2017	
Tehuelche INTA		<i>S. matsudana</i>	<i>S. alba</i>	Inscripto en 2022	
Tradicionales	Ragonese 131-27 INTA	<i>S. babylonica</i>	<i>S. alba</i>		
	Barrett 13-44 INTA	<i>S. matsudana</i>	<i>S. alba</i>		
	Soveny Americano	<i>S. babylonica</i> var. <i>Sacramenta</i>		Clones testigo	

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La inscripción de los cuatro clones de sauce seleccionados, aprobada por el INASE el 12/08/2025, se encuentra disponible en el catálogo nacional de cultivares (<https://gestion.inase.gob.ar/registroCultivares/publico/catalogo>) y se enuncian a continuación con su correspondiente nombre registrado, número de registro (N° RNC) y código experimental (CE): a) **Bravo INTA**, N° RNC 24243, CE 95.07.11; b) **Tango INTA**, N° RNC 24242, CE 98.07.71; c) **Pampero INTA**, N° RNC 24240, CE 98.11.01 y d) **Brazo Largo INTA**, N° RNC 24241, CE C-30-12.



Crecimiento: Como se observa en el Gráfico 1, los valores de Incremento Medio Anual (IMA) de los cuatro nuevos clones (indicados en color verde) superan a los testigos tradicionales (en negro) y se encuentran en el rango de los clones mejorados inscriptos (en azul). En amarillo se muestra una serie de genotipos preseleccionados por su tasa de crecimiento y performance forestal general, sobre los que se continuara el proceso de mejora genética para definir su potencial incorporación al RNC.

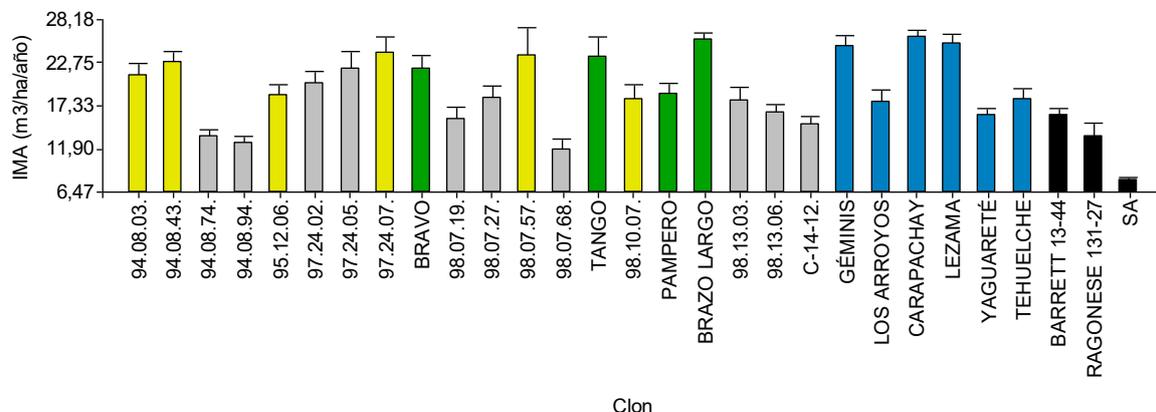


Gráfico 1. Incremento medio anual de volumen (IMA) en m³. ha⁻¹. año⁻¹ de los cuatro clones selectos (en verde), comparados con 6 clones seleccionados entre 2013 y 2022 (en azul) y los sauces tradicionales como control (en negro).

Aptitud industrial: El resultado de los estudios papeleros demostró que Bravo INTA, Pampero INTA y Tango INTA tienen calidad superior, equivalente al Soveny Americano (Gráfico 2). Además, la buena respuesta en pruebas realizadas en aserradero los califica como “doble propósito”, junto a Carapachay, Géminis, Lezama, Los Arroyos, Tehuelche y Yaguareté.

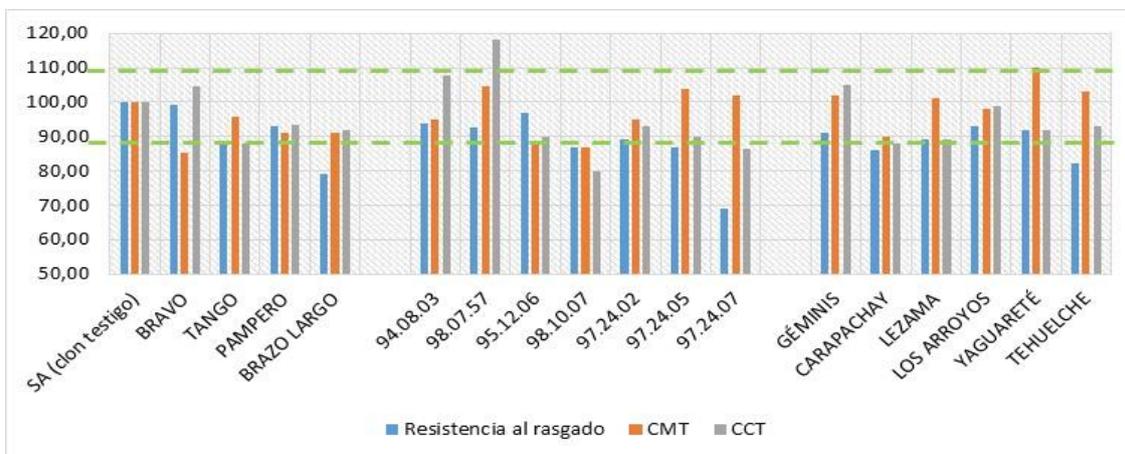


Gráfico 2. Comparación de las principales propiedades papeleras de los genotipos en estudio respecto al testigo Soveny Americano (SA) ± 10 % (indicado en líneas punteadas en verde).

Adaptabilidad: los cuatro clones están adaptados para sitios bajos con buena provisión y drenaje de agua. Brazo Largo INTA se destaca por la mayor tolerancia al estrés por anegamiento, un rasgo de rusticidad muy asociado a la especie *Salix nigra*, a la que el clon pertenece. En cambio, Tango INTA, Bravo INTA y Pampero INTA son más tolerantes ante situaciones de alternancias marcadas de períodos con exceso de agua y sequía, siendo más propio este rasgo de los híbridos de *Salix matsudana* x *S. alba*, respecto a los clones donde interviene *Salix nigra*. Por el contrario, en sitios expuestos a déficits hídricos significativos Brazo Largo INTA muestra la menor tolerancia de los cuatro selectos; su comportamiento es similar al del híbrido Lezama INTA CIEF (*S. matsudana* x *S. nigra*). Todo esto aconseja enfatizar en la recomendación de utilizar estos clones con *Salix nigra* para sitios bajos, o altos donde se mantenga un nivel de humedad sostenido, evitando sitios con variaciones hídricas considerables. En cuanto al potencial para plantación en suelos con salinidad, Tango INTA muestra un destacado comportamiento



frente a esa problemática. Según evaluaciones realizadas en los valles irrigados de Patagonia Norte (Montero et al., 2017) este clon mostró buena supervivencia y crecimiento aún en lotes con niveles de CE entre 6,5 a 7,2 dS m⁻¹, destacándose junto al clon experimental 98.10.07 y a Los Arroyos INTA CIEF y Tehuelche INTA CIEF. Estos resultados son consistentes con lo reportado en el mundo por otros autores sobre la resiliencia de los sauces a este tipo de estrés, dependiendo de la especie y el híbrido. En este sentido, Saini et al. (2022) en ensayos realizados en India hallaron las mayores supervivencias en híbridos de *Salix matsudana* x *S. alba* y en clones de *Salix alba* expuestos a tratamientos de salinidad con 8 dS m⁻¹ donde sobrevivió el 60 %. Estos resultados nacionales y los antecedentes internacionales son auspiciosos para avanzar con nuevos ensayos probando híbridos de la misma combinación genética en otros sitios con esta problemática.

En el Anexo I se presenta una síntesis de los descriptores relevantes para diferenciar los clones.

4. CONCLUSIONES

Los nuevos clones inscriptos aportarán diversidad genética a las plantaciones y, de este modo, contribuirán a la menor vulnerabilidad frente a estreses bióticos y abióticos, factor crítico en un sistema de cultivo basado en la propagación agámica. La capacidad de adaptación de este producto tecnológico a diferentes limitantes (como sitios bajos con anegamientos, terrenos con alternancias marcadas de exceso de humedad y sequía o suelos salinos) abrirá nuevas perspectivas para mejorar las plantaciones. Esa adaptabilidad, integrada a la aptitud tecnológica “doble propósito” y el rápido crecimiento (que posibilita aprovechamientos en turnos más cortos respecto a los sauces tradicionales) son aspectos clave para aumentar la eficiencia de las plantaciones, lo que califica a estos clones como materiales genéticos ambientalmente más sostenibles.

El producto tecnológico también aportará beneficios para los forestadores, los viveristas, las industrias y otros usuarios, mejorando procesos y propiciando nuevas oportunidades de negocios, como el suministro de material de propagación para plantaciones a establecer en el núcleo de cultivo y en otros sitios del país con potencial para sauces.

En función de las características valoradas integradamente estos cuatro híbridos, junto a los otros clones inscriptos en 2013-2022, constituyen una innovación tecnológica para mejorar la matriz productiva de este género forestal en el delta del Paraná y contribuir al desarrollo del cultivo en otras regiones del país con potencial para plantaciones de sauce.

5. LITERATURA CITADA

- ATENCIA, M.E. 2010. Tecnología de corte y secado de madera de sauce. En: Actas de I Jornada Técnica sobre el Sauce. EEA Delta del Paraná, INTA. ISSN 1514-3910. 22 de julio 2010.
- BORODOWSKI, E. 2017. Jornadas de Salicáceas7: Quinto Congreso Internacional de Salicáceas. Talca, Chile.
- CERRILLO, T.; THOMAS, E.; LOVAL, S. 2022. Nuevos híbridos de sauce seleccionados para producción de madera aplicable a diferentes usos y ambientes. IX Reunión GeMFO, López, J.A (Ed.). Pp. 29-32. <https://drive.google.com/file/d/11QiyCQOSH3AMVbCl2RYbomq3fQ-VpJzn/view>
- GRANDE, J. 2022. Estudios de aptitud papelera para el proceso de Papel Prensa. Presentación en V Jornadas Técnicas sobre el Sauce, San Fernando, 10-11 de noviembre de 2022.
- ISEBRANDS, J.G.; RICHARDSON, J. 2014. Poplars and willows: trees for society and the environment. Boston, USA: The Food and Agriculture Organization of the United Nations and CABI, 634.
- MONTERO, E.; THOMAS, E.; ORTIZ, S.; CERRILLO, T. 2017. Crecimiento de nuevos sauces en suelos salino-sódicos de los valles irrigados del norte de la Patagonia Argentina. V Congreso Internacional de Salicáceas. Talca, Chile. noviembre de 2017, p. 302-307. <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/2330>
- 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/>.



ROTHERHAM, I.D. 2022. Willows in the farming landscape: a forgotten eco-cultural icon. *Biodivers Conserv* 31, 2495–2513. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02324-2>.

SAINI, N.; BANYAL, R.; MANN, A.; BHARDWAJ, A.K.; DHILLON, R.S.; KUMAR, J.; SAINI, V.; YADAV R.K. 2022 Examining the Effect of Salinity on Tree Willow Clones for their Adaptation in Saline Ecologies *Journal of Soil Salinity and Water Quality* 14(1): 146-160.

SKINNER, C. 2022. A review of Willow (*Salix* spp.) as an integrated biorefinery feedstock. *Industrial Crops & Products* 189 (2022) 115823.

Anexo I. Principales características morfológicas y fenológicas para diferenciar los clones seleccionados.

DESCRIPTORES		Bravo INTA (ex 95.07.11)	Tango INTA (ex 98.07.71)	Pampero INTA (ex 98.11.01)	Brazo Largo INTA (ex C-30-12)
PLANTA	Sexo	Masculino 	Femenino 	Femenino 	Femenino 
	TALLO				
RAMAS	Color lado asoleado en el tercio medio (verano del 1º año)	verde claro	marrón - verde	verde	verde
	Color del lado asoleado a 20 cm desde la punta (verano del 1º año)	verde marrón	marrón - rojo	verde marrón	verde
	Color de las yemas vegetativas	marrón rojizo	marrón rojizo	marrón rojizo	marrón verdusco
LIMBO	Ángulo entre los primeros 5 cm y el tallo en la base de ramas de 1 año	algo agudo a recto 	agudo 	agudo 	agudo 
	Color de la cara superior	verde	verde	verde	verde
PECÍOLO	Color de la cara inferior	verde grisáceo	verde grisáceo	verde grisáceo	verde
	Color de la cara superior	verde rojizo	verde violáceo	verde violáceo	verde violáceo
ESTÍPULAS	Color de la cara inferior	verde rojizo	verde rosado	verde rojizo	Verde
	A 20 cm desde la punta del tallo principal	presente	presente	presente	presente
	En el tercio medio de rama de 1 año	ausente	ausente	presente	presente
	Persistencia en el tercio medio en rama de 1 año	no persistente	no persistente	no persistente	persistente
FENOLOGÍA	Tipo	tipo 2 (más angostas) 	tipo 3 (más anchas) 		tipo 3 (más anchas) 
	Brotación	medio	medio	temprana	tardía
	Época de fin de crecimiento de la rama	tardía	medio	medio	tardía



PRIMEROS CLONES REGISTRADOS DE *Salix humboldtiana* Willd. CON ORIGEN EN EL DELTA DEL PARANÁ

Teresa CERRILLO¹; Florencia POMPONIO²; Victorio DIETA¹; Sabrina LOVAL¹; Susana TORALES²

RESUMEN

Con el objetivo principal de contribuir a la conservación de *Salix humboldtiana* Willd. (sauce criollo), y de asegurar la disponibilidad de material genético de la especie, desde 2009 el INTA Delta desarrolla una línea de trabajo centrada en el germoplasma proveniente del delta del río Paraná, donde este sauce constituye un componente fundamental del ecosistema. Noventa genotipos colectados en el delta bonaerense y entrerriano se instalaron en un banco de germoplasma en la E.E.A. Delta del Paraná de INTA, iniciando un proceso basado en análisis morfométricos complementados con estudios moleculares. Como resultado, en 2023 se arribó a la selección final de nueve clones destacados según criterios preestablecidos: porcentaje de supervivencia, crecimiento, tolerancia/resistencia a enfermedades y capacidad de rebrote. Siete de estos genotipos ya se encuentran inscriptos en el Registro Nacional de Cultivares (RNC) del INASE y están disponibles en apoyo de la conservación y para satisfacer una demanda en auge de este tipo de especies. Se describe en este trabajo parte del proceso llevado a cabo y las principales características que distinguen a los clones.

Palabras clave: *sauce criollo*, *domesticación y mejoramiento*, *descriptores*, *clones*, *registro*

1. INTRODUCCIÓN

El género *Salix*, familia Salicaceae, agrupa entre 300 y 500 especies, con distribución natural casi exclusivamente en el hemisferio norte (Dorn, 1976; Martini y Paiero, 1980; Kuzovkina y Vietto, 2014). *Salix humboldtiana* Willd. (sauce criollo), es el único sauce autóctono de Sudamérica, donde sus poblaciones se hallan muy disminuidas, principalmente debido al uso intensivo y a la modificación de los hábitats ribereños por otras especies arbustivas y arbóreas (Giaccio et al., 2022).

Su distribución en Argentina va desde el extremo norte hasta Chubut. En el delta del río Paraná, las poblaciones también han disminuido su pureza, especialmente en las zonas de cultivo o en sitios próximos a éstas, debido a la hibridación con clones de especies no nativas, que se aplican en los sistemas de producción. El inicio de este proceso se remonta a la segunda mitad del siglo XIX, con la introducción de un individuo femenino de *Salix babylonica* (Ragonese, 1989), que al cruzarse con *Salix humboldtiana* dio origen a un complejo de híbridos (Hunziker, 1958), posteriormente denominados *Salix* × *argentinensis* (Ragonese y Rial Alberti, 1966). Más tarde, con la introducción de otras especies, se generaron nuevas hibridaciones.

Atendiendo a la necesidad de implementar acciones para la conservación y el estudio de la especie, desde 2009 el INTA Delta desarrolla un trabajo de relevamiento y evaluación de material genético, en el marco del Programa de Mejoramiento de Sauces, con el apoyo de la Red de Recursos Genéticos y del Programa Nacional Forestales de INTA. Los objetivos principales del proyecto se orientaron a:

- Aportar a la conservación de los recursos genéticos de la especie en la región.
- Generar una base de germoplasma de la especie para su infusión en el programa de mejoramiento genético, valorando la existencia de genes de adaptación y su potencial para una amplia diversidad de usos.

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

² Instituto de Recursos Biológicos-CIRN INTA Castelar



- Contar con materiales puros de la especie, registrados según la normativa vigente y para su difusión ante una demanda creciente y oferta actual con falta de trazabilidad.

Como resultado, se han podido identificar poblaciones e individuos con las características fenotípicas de *Salix humboldtiana* (Cerrillo et al., 2018), cuya correspondencia con la especie pudo ser corroborada a través de estudios moleculares (Pomponio et al., 2018). Se describen en este trabajo los primeros ocho clones de la especie seleccionados e inscriptos en 2025 y el proceso para su obtención (Gráfico 1).

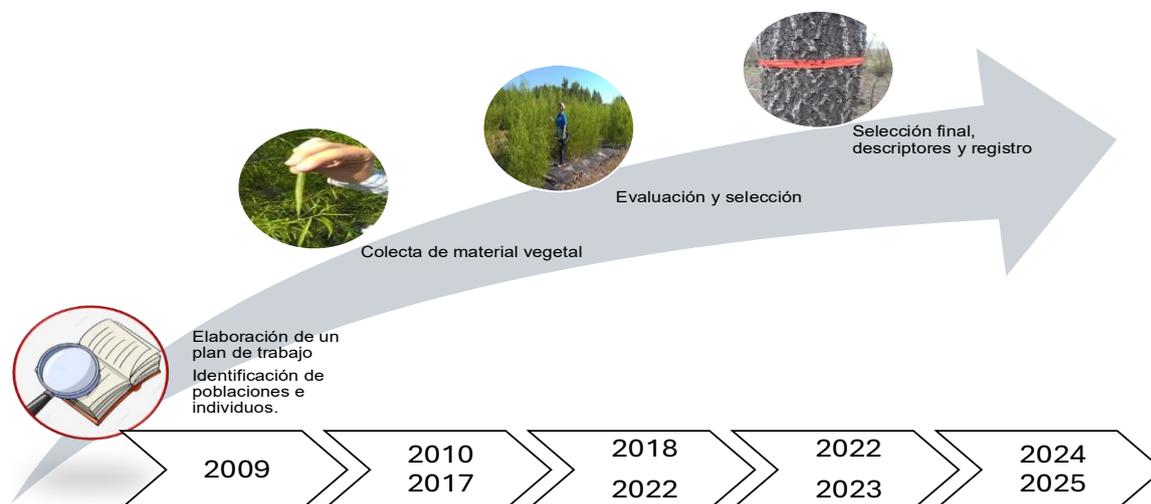


Gráfico 1. Línea de tiempo del proceso integral llevado a cabo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Colecta de material vegetal: El proyecto comprendió el relevamiento, colecta y estudio de un total de 90 accesiones de “sauce criollo” muestreadas en el delta del Paraná, en áreas de Diamante y Victoria, Entre Ríos, y en Islas de San Fernando, Campana y San Pedro en la provincia de Buenos Aires, en un rango geográfico comprendido entre las coordenadas: 34° 15' 87" S, 58° 75'02" O y 32° 07' 33"S, 58°65'31" O, donde se identificaron individuos aislados y poblaciones (Imágenes 1 y 2).

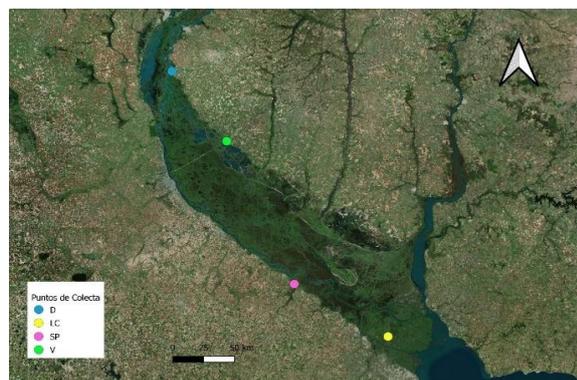


Imagen 1. Imagen satelital del delta del río Paraná. Puntos de colecta de las diferentes accesiones.



Imagen 2. Punto de colecta en riacho Victoria, Entre Ríos.

Proceso de evaluación y criterios de selección: Todos los individuos se instalaron en un banco de germoplasma *ex-situ* en la E.E.A Delta del Paraná de INTA (34° 08' 42" S; 58°12' O), en un esquema con 10 plantas por individuo, a un espaciamiento de 0,5 m x 1 m, iniciándose un proceso de domesticación y evaluación sobre la base de criterios preestablecidos: enraizamiento, supervivencia al año, capacidad de recepado luego de cortes anuales y síntomas/signos de enfermedades que afectan a los sauces, entre las principales: roya (*Melampsora salicina*), antracnosis (*Marssonina salicicola*) y daños corticales generados por el complejo *Fusarium* spp - *Schizospora* spp. Sobre la base de los criterios de selección se realizó un “screening” en etapas, sobre la base de evaluaciones en plantas de 2 y 3 años.



Descriptores y registro: Para la inscripción en el Registro Nacional de Cultivares (RNC), se utilizaron los descriptores morfológicos para el género *Salix* requeridos por el INASE, referidos a atributos físicos y observables que permiten distinguir y caracterizar el material genético seleccionado. En total se evaluaron 59 características morfológicas y fenológicas, entre ellas: sexo, época de brotación y de cese del crecimiento, porte del tallo principal, color de las ramas, color de la yema vegetativa, presencia/ausencia de estípulas forma de la hoja. Estas variables deben monitorearse en diferentes estaciones del año y en distintas etapas de desarrollo de la planta (primer y segundo año, y edad adulta).

Complementariamente, se efectuaron estudios para conocer la variabilidad genética a través de técnicas moleculares, a través del análisis del ADN extraído de hojas de los individuos, empleando marcadores moleculares microsatélites SSR (*simple sequence repeat*).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una evaluación inicial de los 90 individuos realizada al año de la plantación a campo dio como resultado un grupo de 50 clones preseleccionados, conservándose los que mostraron un prendimiento $\geq 70\%$, con alturas promedio del tallo dominante entre 1,90 m y 3,40 m.

A los 4 años se efectuó un segundo cribado, sobre un total de 30 plantas por individuos, que dio como resultado nueve genotipos selectos (Cuadro 1). Para la selección se tomaron los genotipos que presentaron una supervivencia $\geq 90\%$, ausencia de síntomas/signos de roya, antracnosis y enfermedades de corteza, sumado también una alta supervivencia de la cepa tras cortes realizados en el invierno ($\geq 90\%$). La media de las alturas del fuste principal fue de 9,61 m para el grupo de selectos; SP, D3, D5, D6 y D7 mostraron los mejores valores (Gráfico 2). Los resultados se validaron a través de dos réplicas realizadas con estacas de los nueve clones selectos (20 estacas por clon), con una configuración de 0,50 m x 1,00 m. La repetición mostró datos de altura a los dos años consistentes con los registrados en la evaluación realizada a los 4 años que se muestra en el Gráfico 2.

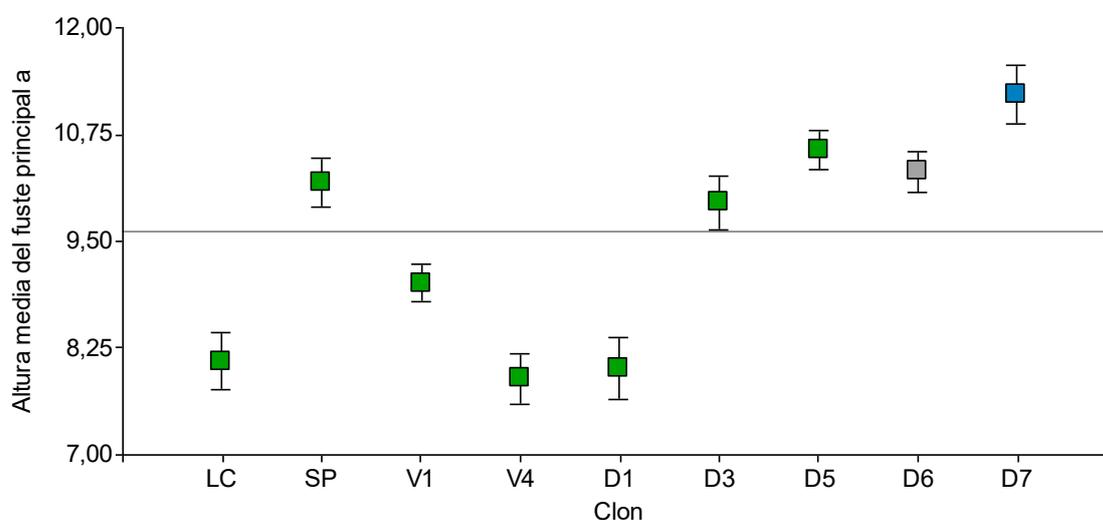


Gráfico 2. Altura media del fuste dominante de los clones selectos al cuarto año (en verde: los clones inscriptos; en azul: con solicitud de inscripción y en gris: en etapa de desarrollo de descriptores).

Respecto al porte del eje principal, como se observa en el Cuadro 2, hay variabilidad desde portes curvados (V4) o suavemente curvados (V1, D1, D3 y LC) a muy derechos (SP, D6 y D7). Esta gama puede resultar valiosa para aplicar en sistemas de restauración, paisajismo y usos ambientales. Además, en el caso de SP, D6 y D7 la destacada rectitud junto al crecimiento y buen estado sanitario general, los convierten en promisorios para aplicación forestal, sea como uso directo de estos clones o bien para ser incorporados como parentales en el programa de mejora genética. Con el objetivo de avanzar hacia una caracterización más precisa sobre usos industriales, se espera poder desarrollar en el corto plazo pruebas en las industrias que utilizan habitualmente la madera de sauces de cultivo (elaboración de papel para embalaje y para diarios y aserrado).

**Cuadro1.** Estado de registro de los nueve clones selectos.

Estatus	Código experimental	Nombre de cultivar registrado	Número en RNC del INASE (*)	Fecha de inscripción en RNC
Inscriptos	LC	Ribera del Río Carabelas INTA	22794	03/01/2025
	SP	San Pedro 1 INTA	22793	03/01/2025
	V1	Riacho Victoria 1 INTA	22791	
	V4	Riacho Victoria 1 INTA	22792	22/10/2024
	D1	Costa de Diamante 1 INTA	22788	22/10/2024
	D3	Costa de Diamante 3 INTA	22789	22/10/2024
	D5	Costa de Diamante 5 INTA	22790	22/10/2024
	Inscripción solicitada	D7		
En fase descriptiva	D6	Costa de Diamante 7 INTA		

(*) <https://gestion.inase.gob.ar/registroCultivares/publico/catalogo>**Cuadro2.** Principales características morfológicas de los clones seleccionados o descriptores.

DESCRIPTOR	LC	SP1	V1	V4	D1	D3	D5	D7
Sexo	Femenino	Masculino	Femenino	Masculino	Femenino	Femenino	Femenino	Femenino
Porte del tallo principal en plantas de 1 y 2 años	Suavemente curvado	Derecho	Suavemente curvado	Curvado	Derecho	Suavemente curvado	Derecho	Derecho
Tallo principal: color del lado asoleado en el tercio medio (verano del 1er año)	Verde	Verde	Marrón gris	Marrón verde	Verde	Verde gris	Verde gris	Verde
Tallo principal: color del lado asoleado a 20 cm de la punta	Verde Claro	Verde Claro	Verde	Marrón rojo	Verde	Verde	Marrón rojo	Verde
Color de las yemas vegetativas	Verde Claro	Verde Claro	Verde Claro	Verde claro	Verde verdusco	Verde claro (levemente rosado)	Marrón rojizo	Verde claro
Rama: porte de la base en otoño del 2º año	Curvada para arriba	Primero curvada para abajo, luego para arriba	Primero curvada para abajo, luego para arriba	Primero curvada para abajo, luego para arriba	Curvada para arriba	Curvada para arriba	Derecha, levemente curvada para abajo	Derecha
Rama: color sobre el lado insolado	Verde rojizo	Verde-marrón	Verde-marrón	Verde-marrón	Marrón (verdoso en sectores)	Marrón (verdoso en sectores)	Marrón rojo	Rojo violeta
Limbo: incisiones del margen	Profundas	Poco profundas	Poco profundas	Medio	Poco profundas	Medio	Medio	Profundas
Peciolo: color de la cara superior	Verde rosáceo	Verde	Verde rosáceo	Verde	Verde rosáceo	Verde rosáceo	Verde violáceo	Verde violáceo
Peciolo: color de la cara inferior	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde rojizo	Verde rojizo	Verde rojizo	Verde rojizo
Estípulas a 20 cm desde la punta del tallo principal	Sí	No	Sí	No	No	No	No	No
Estípulas en el tercio medio rama 1 año	No	No	No	No	No	No	No	No
Estípulas: persistencia a 20 cm desde punta del tallo, en rama de 1 año	Persisten	----	Persisten	----	----	----	----	----
Estípulas: persistencia en el tercio medio en rama de 1 año	No persisten	----	No persisten	----	----	----	----	----
Estípulas: tipo	Tipo 2	----	Tipo 1	----	----	----	----	----
Estípulas: incisiones en el margen	Sí	----	Sí	----	----	----	----	----

Todos los clones selectos presentan brotación muy temprana: (inicio: primera quincena de agosto) y época de fin de crecimiento: muy tardía (fines de abril).



Estudios moleculares: Como complemento a los análisis morfométricos, se realizaron estudios con marcadores moleculares. En una primera etapa los materiales fueron analizados con un marcador de tipo microsatélite con capacidad para la detección de híbridos (Bozzi et al., 2012). Con este marcador, pudo corroborarse que las muestras analizadas corresponderían a individuos de *Salix humboldtiana* puros y diploides, no encontrándose híbridos en el material analizado. Posteriormente se realizó un screening de 26 marcadores microsatélites de los cuales 5 mostraron diferencias (polimorfismo) entre los individuos. Estos marcadores constituyen una herramienta valiosa ya que permiten evaluar la variabilidad y las características genéticas de esta especie (Pomponio et al., 2018; López et al., 2022).

4. CONCLUSIONES

Esta primera selección de nueve cultivares de *Salix humboldtiana* representa un hito hacia la conservación del sauce criollo en el delta del río Paraná, donde es parte representativa del ecosistema. Preservar estos recursos genéticos portadores de rasgos de adaptación tiene valor estratégico para proyectos relacionados con la restauración de paisajes, fitorremediación, apoyo a emprendimientos apícolas y otros servicios. Además, los clones de mejor crecimiento y portes más rectos tienen potencial para generación de biomasa, como así también para fitomejoramiento a través del aporte de genes para futuros planes de cruzamientos controlados.

Por otra parte, en el contexto actual donde la comercialización de material vegetativo de sauce criollo se lleva a cabo a través de viveros sobre la base de materiales obtenidos de modo informal, estos primeros clones de la especie que pasan a integrar el Catálogo Nacional de Cultivares del INASE, proporcionan la certeza de disponer de material genético con pureza varietal y trazabilidad, beneficiando la calidad integral del sistema.

5. LITERATURA CITADA

- BOZZI, J.; LIEPELT, S.; OHNEISER, S.; GALLO, L.; MARCHELLI, P.; LEYER, I.; ZIEGENHAGEN, B.; MENGEL, C. 2015. Characterization of 23 polymorphic SSR markers in *Salix humboldtiana* (Salicaceae) using next-generation sequencing and cross-amplification from related species. *Applications in Plant Sciences* 3(4): 1400120
- CERRILLO, T.; TORALES, S.; POMPONIO, F.; LOVAL, S.; DIETA, D.V. 2018. Collection and characterization of the native species *Salix humboldtiana* Willd in the Delta of Paraná, towards their conservation and improvement. Conference: Seventh International Poplar Symposium. Buenos Aires, November 2018
- DORN, R. 1976. A synopsis of American *Salix*. *Canadian Journal of Botany*, vol 54.
- GIACCIO, G.; PÉREZ, D.; GALLO, L.; CORRAL, R.; POMPONIO, M. et al. 2022. *Salix humboldtiana* único sauce nativo: Re-introducción y restauración de ambientes ribereños degradados por actividades agrícolas. *Visión Rural* 144: 40-43.
- HUNZIKER, J. 1958. Estudios citogenéticos en *Salix humboldtiana* y en sauces híbridos triploides cultivados en la Argentina. *Revista de Investigaciones Agrícolas (IDIA)*, TXII, No. 2, Buenos Aires.
- KUZOVKINA, Y.A.; VIETTO, L. 2014 An update on the cultivar registration of *Populus* and *Salix* (Salicaceae) *Skvortsovia* 1 133 148
- LÓPEZ, M., POMPONIO, M.; TORALES, S.; CERRILLO, T.; MIRRA, F.; VÁSQUEZ, C. 2022. Estudios de diversidad genética en *Salix humboldtiana* mediante el uso de SSRs. *Anuario De Investigación USAL*, (8). Recuperado a partir de: <https://p3.usal.edu.ar/index.php/anuarioinvestigacion/article/view/5712>
- MARTINI, F.; P. PAIERO. 1988. *I Salici D'Italia*. Guida al riconoscimento e all'utilizzazione pratica. Edizioni LINT Trieste; Italia.
- POMPONIO, F.; CERRILLO, T.; GALLO, L.; LÓPEZ, M.; TORALES, S. 2018. Populations genetic diversity analysis as support for Native Willow Rescue in Argentina. Conference: Seventh International Poplar Symposium. Buenos Aires, November 2018.
- RAGONESE, A.; RIAL ALBERTI, F. 1966. Cultivo, utilización y fitotecnia de sauces en la República Argentina. *IDIA- Suplemento Forestal* 1966. p. 21-37.



POTENCIAL PARA FITORREMIEDIACIÓN DE SAUCE CRIOLLO EN SUELOS CONTAMINADOS DE RIBERA. EVALUACION PRELIMINAR

Teresa CERRILLO¹; Victorio DIETA¹; Esteban THOMAS²; Mauro FERNÁNDEZ¹; Gabriel GIULIANO¹; Sabrina LOVAL¹; Virginia LUQUEZ³

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar la capacidad fitoextractora de material genético de “sauce criollo” (*Salix humboldtiana* Willd.) se identificó un suelo con signos de contaminación, lo que se verificó a través de un análisis de los sedimentos que mostró valores máximos de Cu 35,2 mg/kg; Pb 36,9 mg/kg y Zn 159,8 mg/kg. La experiencia para detectar la posible acumulación de metales pesados en la biomasa (como indicador de la capacidad de fitorremediación) se estableció en 2023 en un ambiente ribereño sobre el río Luján, San Fernando Provincia de Buenos Aires (34°26'12" S, 58°32'30" O), aplicando un diseño completamente aleatorizado, con estacas de 7 genotipos de la especie nativa en 4 repeticiones. Transcurrido el primer ciclo vegetativo, a través de un análisis de laboratorio realizado sobre tejidos de hojas, tallos y raíces extraídas del clon “Costa de Diamante 5 INTA” se detectó la presencia de Cd, Cr, Pb y Zn en las tres partes de la planta, con diferencias de distribución según el metal pesado. Esta acumulación en un lapso corto representa un indicador de interés respecto a su potencial de remediación en sitios contaminados. Al mismo tiempo, la presente investigación contribuye a la restauración y conservación de la especie nativa *Salix humboldtiana* en zonas ribereñas, que constituyen su hábitat natural.

Palabras clave: *Salix*, clones, suelos, metales pesados, remediación, selección

1. INTRODUCCIÓN

Una considerable cantidad de sitios en el mundo están contaminados por diferentes factores, como el vuelco a cursos de agua de residuos industriales sin el tratamiento adecuado (Landberg y Greger, 2022). Entre los contaminantes, los metales pesados como el cadmio (Cd), el cromo (Cr), el plomo (Pb) y el zinc (Zn) pueden afectar la calidad ambiental y la salud humana. En este contexto, la fitorremediación se ha venido consolidando en el mundo como una alternativa ecológica a otras formas de remediación, como las de tipo físico y químico, que generan subproductos indeseables o causan cambios en las matrices sometidas a la remediación. La fitorremediación es considerada una alternativa económica, ya que implica el uso de plantas para eliminar contaminantes del ambiente sin requerir altos costos de energía ni productos químicos onerosos (Wei et al., 2021). Teniendo en cuenta que estos procesos se dan frecuentemente en áreas bajas con fluctuaciones de agua, resulta muy importante contar con especies seleccionadas que hayan mostrado buena capacidad de acumulación de metales pesados, a la vez que posean tolerancia a la toxicidad y a las inundaciones (Ponting et al., 2021). Según Yang et al. (2020), *Salix* sp. es un candidato prometedor debido a la alta producción de biomasa, fácil propagación, alta capacidad de acumulación de metales y amplia adaptación al estrés ambiental. Actúan mitigando los impactos adversos del cambio climático y la contaminación del suelo, especialmente en entornos con alto contenido de humedad, donde muestran excelentes respuestas morfológicas y fisiológicas a las inundaciones (Cao et al, 2022). *Salix humboldtiana* Willd es la única especie de sauce nativa de Sudamérica, está presente en Argentina desde el norte hasta Chubut. Es

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

² EEA Alto Valle, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Río Negro.

³ INFIVE (CONICET-UNLP), La Plata



parte del ecosistema de los bosques en galería de la Mesopotamia y se halla en poblaciones distribuidas en las islas del Delta del Paraná, con grado variable de pureza debido a la alta frecuencia de hibridación con especies exóticas cultivadas.

Los **objetivos** del trabajo fueron: a) Explorar el potencial de “sauce criollo” *Salix humboldtiana* Willd. para remediar suelos contaminados. b) Promover la conservación de los recursos genéticos nativos y la restauración del ambiente ribereño mediante clones de esta especie de sauce.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio: el ensayo se plantó en un ambiente ribereño sobre el río Luján, en la costa del ecoparque, una reserva urbana establecida en 2023 por el municipio de San Fernando, provincia de Buenos Aires. El sitio tiene influencia del río Reconquista (cuya desembocadura dista a 6.035 metros del sitio) y del río Tigre (a 4.694 metros), dos cursos históricamente afectados por múltiples contaminantes, entre ellos metales pesados (34°26'12" S, 58°32'30" O) (Imagen 1).

Material vegetal en estudio: en el invierno de 2023 se plantaron estacas de 0,80 m de longitud de 7 genotipos de *Salix humboldtiana* obtenidas de la colección para domesticación y mejoramiento establecida en la E.E.A. Delta del Paraná de INTA (Imagen 2), con un arreglo en bloques completos aleatorizados, con parcelas de un solo árbol y 4 repeticiones por individuo/bloque.

Análisis de sedimentos: previo al establecimiento de las estacas se llevó a cabo un muestreo de sedimentos, seguido de un análisis de laboratorio para detectar la posible presencia de metales pesados en el sitio (Imagen 3). El suelo analizado en este estudio se recogió de la capa superior (0–20 cm) y mostró un alto nivel de metales pesados para: Cu = 19,2 - 35,2 mg·kg⁻¹; Pb = 10,6 - 36,9 mg·kg⁻¹; Zn = 77,1 - 159,8 mg·kg⁻¹, de acuerdo con los estándares de calidad por metales pesados del Canadian Council of Ministers of the Environment (<https://ccme.ca/en>).



Imagen 1. Sitio de instalación del ensayo



Imagen 2. Estaquero de donde se obtuvo el material vegetal



Imagen 3. Toma de muestras de sedimentos

Primera medición del ensayo: al año de plantación se registró la supervivencia y se midió altura total del tallo principal de todas las plantas. En las imágenes 4, 5, 6, 7 y 8 se observa la evolución del crecimiento del ensayo.

Análisis de tejidos vegetales: cumplido el primer ciclo vegetativo se realizó un muestreo de tejidos del genotipo Costa de Diamante 5 INTA (uno de los que mostraron mayor crecimiento), tomándose muestras de raíces, tallos y hojas, que fueron enviadas a laboratorio para su análisis.



Imagen 4. Estacas recién plantadas en invierno



Imagen 5. Plantas a inicios de primavera



Imágenes 6 y 7. Vista a fines de primavera



Imagen 8. Vista a inicios del otoño



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primera medición del ensayo: la supervivencia fue del 100 % en el bloque I (ubicado en el sector más elevado del talud y, por lo tanto, no sometido a las inundaciones periódicas); 85,7 % en el bloque II y 71,4 % en el bloque III; mientras que el bloque IV (en la zona más baja del talud) presentó mortandad de todos los ejemplares. Esto último ocurrió debido a que el bloque estuvo con inundaciones recurrentes que ocasionaban la cobertura total de las plantas (según el monitoreo semanal que se llevó a cabo durante el primer ciclo de crecimiento). En cuanto al crecimiento, no se encontraron diferencias significativas entre las alturas medias de los genotipos, pero sí entre bloques (3,07 m en el bloque I; 2,22 m en el II y 0,77 m en el bloque III).

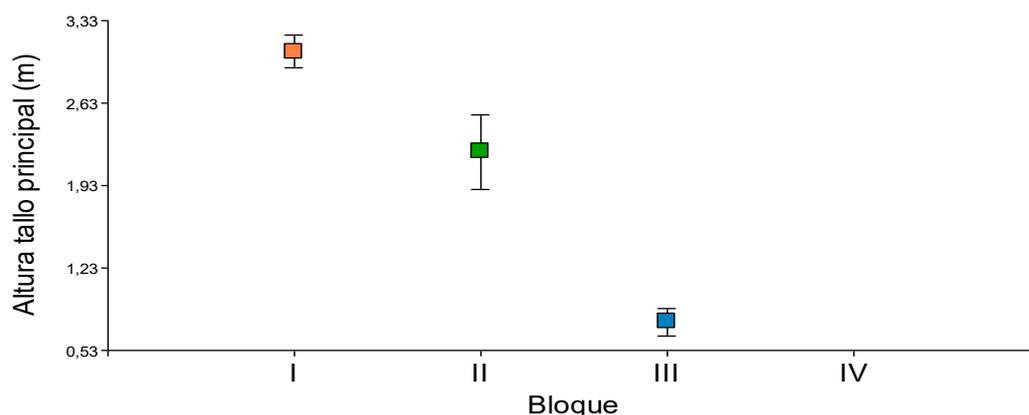


Gráfico 1. Comparación de la altura del tallo principal al año de plantación en los bloques establecidos en el talud ribereño.

Análisis de tejidos vegetales al año de plantación: el análisis de los ejemplares muestreados evidenció acumulación de metales pesados (Cd, Cr, Pb y Zn) en raíces, tallos y hojas; no obstante, no se observaron efectos de toxicidad a esta edad temprana. El Cd se acumuló sin diferencias significativas entre las partes de la planta. Por otro lado, en correspondencia por lo hallado por Tózsér et al (2017), la acumulación fue significativamente diferente entre las partes de la planta en el caso de Cr y Pb (altamente mayor en raíces) y Zn (en hojas), como puede observarse en el Gráfico 2. Será útil la continuidad en las evaluaciones durante los próximos años para verificar si existen variaciones en los patrones de acumulación; según la literatura consultada para especies arbóreas la acumulación aumenta el primer año, estabilizándose al tercer año en la biomasa (Tózsér et al, 2017).

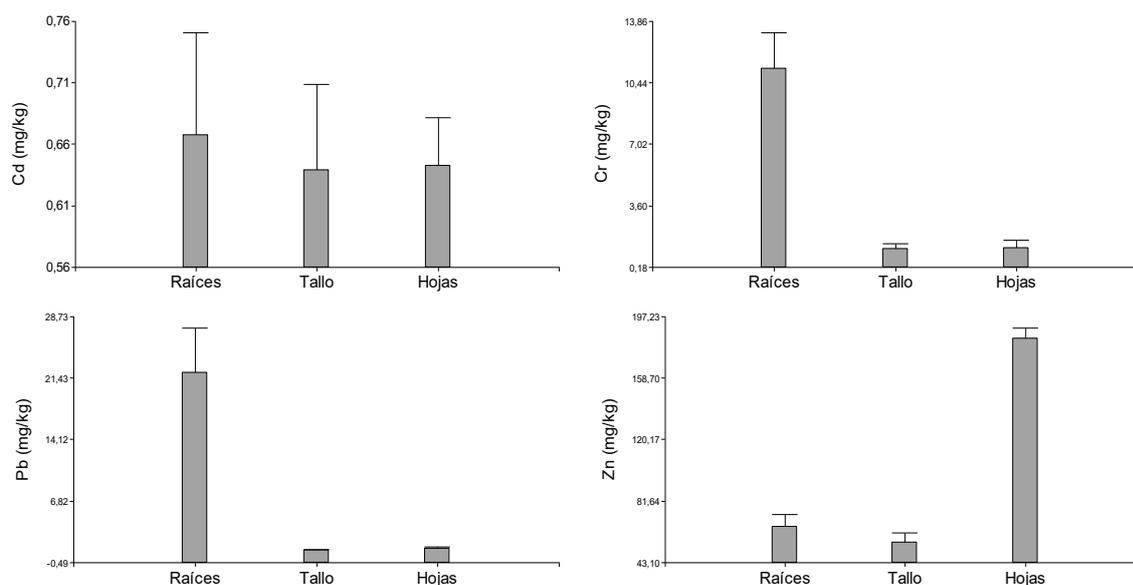


Gráfico 2. Acumulación de metales pesados Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) en raíz, tallo y hojas en plantas de 1 año del genotipo "Costa de Diamante 5 INTA" de *Salix humboldtiana*.



4. CONCLUSIONES

En el presente estudio, todos los individuos evaluados de *Salix humboldtiana* toleraron y crecieron en suelos contaminados con múltiples metales (Cd, Cr, Zn y Pb) en condiciones de exposición variable a inundación, mostrando un alto potencial para afrontar la contaminación en el sitio bajo de ribera. El genotipo "Costa de Diamante 5 INTA" (D1) elegido para el muestreo, en virtud de su alta generación de biomasa, mostró una elevada presencia de metales pesados en la biomasa, por lo que esta capacidad de acumulación en poco tiempo es un indicador de interés respecto a su potencial de remediación. En los próximos años se espera avanzar con estudios para evaluar los mecanismos de acumulación de estos genotipos y sus posibles efectos en las plantas.

Al mismo tiempo, este trabajo experimental inédito contribuye a la restauración y conservación de la única especie nativa de sauces en Sudamérica en zonas ribereñas que constituyen su hábitat natural.

5. LITERATURA CITADA

- CAO, Y.; TAN, Q.; ZHANG, F.; MA, C.; XIAO, J.; CHEN, G. 2022. Phytoremediation potential evaluation of multiple *Salix* clones for heavy metals (Cd, Zn and Pb) in flooded soils. *Science of The Total Environment*. Volume 813, 2022, 152482. ISSN 0048-9697. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721075604>
- LANDBERG, T.; GREGER, M. 2022. Phytoremediation Using Willow in Industrial Contaminated Soil. *Sustainability* 14(14): 8449. <https://doi.org/10.3390/su14148449>.
- LANDBERG, T. 2022. Heavy metal tolerance, uptake, accumulation, and translocation in *Salix* and its application in phytoremediation. Academic dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Plant Physiology at Stockholm University to be publicly defended on Thursday 8 December 2022, Stockholm. ISBN 978-91-8014-084-3 ISBN 978-91-8014-085-0. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:su:diva-210601>
- PONTING, J.; KELLY, T.; VERHOEF, A.; WATTS, M.; SIZMUR, T. 2021. The impact of increased flooding occurrence on the mobility of potentially toxic elements in floodplain soil. Vol 754. 142040, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142040>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720355698>
- TÓZSÉR D, MAGURA T, SIMON E. 2017. Heavy metal uptake by plant parts of willow species: A meta-analysis. *J Hazard Mater*. 2017 Aug 15; 336:101-109. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.03.068. Epub 2017 Apr 27. PMID: 28482187.
- WEI, Z.; VAN LE, Q.; PENG, W.; YANG, Y.; YANG, H.; GU, H.; SHIUNG LAM, S.; SONNE, C. 2021. A review on phytoremediation of contaminants in air, water and soil, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 403, 2021, 123658, ISSN 0304-3894. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123658>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420316447>
- YANG, J.; ZHENG, G.; YANG, J.; WAN, X.; SONG, B.; CAI, W.; GUO, J. 2017. Phytoaccumulation of heavy metals (Pb, Zn, and Cd) by 10 wetland plant species under different hydrological regimes, *Ecological Engineering*, Vol 107, 2017, Pages 56-64, ISSN 0925-8574, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.052>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857417303804>



ANÁLISIS INTEGRADO DE LA INVERSIÓN FORESTAL, LOS COSTOS DESDE LA MADERA EN PIE, Y COSTOS DE COMPENSACIÓN DE CARBONO FORESTAL PARA LOS BOSQUES PLANTADOS A NIVEL MUNDIAL, 2023

Patricio MAC DONAGH¹; Frederick CUBBAGE²; Rafael RUBILAR^{3,4}; Bruno Kanieski DA SILVA⁵; Adriana BUSSONI⁶; Virginia MORALES⁷; Gustavo BALMELLI⁸; Vitor Afonso HOEFLICH⁹; Roger LORD¹⁰; Carmelo HERNÁNDEZ¹¹; Pu ZHANG¹²; Ha Tran Thi THU¹³; Richard Yao¹⁴; Peter HALL¹⁴; Jaana KORHONEN¹⁵; Luis DÍAZ-BALTEIRO¹⁶; Roque RODRÍGUEZ-SOALLEIRO¹⁷; Robert DAVIS¹⁸; Rafael DE LA TORRE¹⁹; Gabriel Jaime LOPERA²⁰; Rafal CHUDY²¹; Jacek SIRY⁵; Nalini Mohan DENDULURI²²; Ana CUBAS-BAEZ²

RESUMEN

Se estimó la rentabilidad de las inversiones forestales para 15 países y 45 especies con datos al 2023. Se utilizaron criterios de análisis de capital, con una tasa de descuento real del 8 %, sin incluir los costos de la tierra. Se estimaron las rentabilidades financieras del manejo de plantaciones para los principales países en América (Brasil, Argentina, Uruguay, Chile, Colombia, Ecuador, Paraguay, México y Estados Unidos), así como para China, Vietnam, India, España, Nueva Zelanda, Finlandia y Polonia. Las tasas de crecimiento de las plantaciones en Sudamérica, Nueva Zelanda y España, y sus rentabilidades, fueron mayores, con tasas internas de retorno (TIR) reales normalmente superiores al 10 %. El Sudeste Asiático registró los precios de madera más altos y las TIR más altas del mundo, superiores al 18 %. Las plantaciones y bosques templados en Estados Unidos y Europa tuvieron una rentabilidad menor, del 3 % al 7 %, pero estos países presentan un menor riesgo, mejores mercados y mayor infraestructura. Estos esfuerzos de investigación pueden ser utilizados por el sector privado para considerar inversiones forestales, o por organizaciones gubernamentales y ONGs para estimar sus costos y retornos de inversión, o para proporcionar incentivos para la provisión de servicios ecosistémicos como el almacenamiento de carbono.

Palabras clave: *Tasas internas de retorno, costos de madera, benchmarking, costos y mitigación de carbono forestal*

¹ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones, Eldorado, Misiones, Argentina.

² Department of Forestry and Environmental Resources, North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. fredcubbage@yahoo.com

³ Cooperativa de Productividad Forestal, Departamento de Silvicultura, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

⁴ Centro Nacional de Excelencia para la Industria de la Madera (CENAMAD), Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

⁵ University of Georgia, USA.

⁶ Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

⁷ Departamento de Ciencias Económicas, Universidad de la República, Tacuarembó, Uruguay.

⁸ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Tacuarembó, Uruguay

⁹ Departamento de Economía Rural e Extensão, Universidade Federal do Paraná, Brasil.

¹⁰ Mason, Bruce & Girard, Inc., Portland, Oregon, USA.

¹¹ Comisión Nacional Forestal, Guadalajara, México.

¹² National School of Development, Peking University, Beijing, China

¹³ Research Institute for Forest Ecology and Environment, Vietnamese Academy for Forest Sciences, Hanoi, Vietnam.

¹⁴ Scion (New Zealand Forest Research Institute Ltd.), Rotorua, New Zealand.

¹⁵ Oak Ridge Institute for Science and Education, U.S. Department of Agriculture (USDA), Knoxville, Tennessee, USA.

¹⁶ Universidad Politécnica de Madrid. E.T.S. de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Madrid, Spain.

¹⁷ Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Universidad de Santiago de Compostela, Santiago, Spain.

¹⁸ International Forestry Consultant, Germantown, Tennessee, USA.

¹⁹ ArborGen Inc., Ridgeville, South Carolina, United States.

²⁰ Compañía Agrícola de la Sierra, Medellín, Colombia

²¹ Forest Business Analytics Sp. z o.o., Łódź, Poland.

²² Consultant, Retired India Department of Forest Conservation.



1. INTRODUCCIÓN

La rentabilidad de las inversiones en tierras forestales es importante para profesionales, inversionistas, organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, e investigadores. Para los inversionistas institucionales y la mayoría de los propietarios de bosques, la rentabilidad potencial de las inversiones en la compra y gestión de bosques es crucial. Estos inversionistas suelen centrarse en la producción de madera u otros productos básicos tangibles, lo que determina la demanda de tierras forestales y la plantación de árboles, así como las edades de rotación de la madera, la gestión de rodales y las actividades de cosecha. Chudy y Cabbage (2021) informan que, en las últimas tres o cuatro décadas, nuevos inversionistas en tierras forestales ya han invertido más de 100 mil millones de dólares en fondos de inversión. La demanda de inversiones en madera y biomasa forestal podría triplicarse en el futuro, y el valor del almacenamiento de carbono podría impulsar la silvicultura como clase de activo a más de 1-1,5 billones de dólares. Estas inversiones forestales se ven favorecidas por un amplio interés en los componentes ambientales, sociales y de gobernanza (ESG) corporativos, así como en la inversión “neta cero” para garantizar que las corporaciones no contribuyan con gases de efecto invernadero o emisiones de carbono adicionales que aceleren el calentamiento global (Brancalion y Chazdon, 2017; Chudy y Cabbage, 2021).

Los bosques proporcionan una gran cantidad de servicios ecosistémicos, incluyendo bienes comerciales y no comerciales. Estos bienes y servicios dependen de las reservas forestales, ya sean naturales o plantadas, de los procesos ecosistémicos y de los mercados, y pueden verse afectados por la gestión, la cosecha o la conservación. Como científicos y autores, hemos colaborado durante unos 20 años, periódicamente, en la elaboración de estimaciones de la rentabilidad de la inversión en el mercado de los bosques plantados y algunos bosques naturales para determinados países y especies (Cabbage et al., 2022).

Los costos de establecimiento y el manejo forestal también son importantes para su consideración en las principales iniciativas nacionales e internacionales propuestas para plantar árboles y restaurar bosques con el fin de almacenar carbono, prevenir mayores emisiones de carbono forestal, compensar otras emisiones de carbono terrestres o industriales y mitigar el calentamiento global. Esto incluye evaluaciones de programas globales masivos de plantación de árboles, como el programa Trillion Trees, para cultivar, restaurar y conservar un billón de árboles en todo el mundo para 2030. Este esfuerzo, así como otros similares de alcance regional o nacional, han centrado la atención en la plantación o restauración forestal. Se requerirá información inicial sobre los costos de plantación, establecimiento y manejo forestal para la planificación, las estimaciones presupuestarias y la búsqueda de capital suficiente antes de poder comenzar a plantar.

El propósito de este documento es proporcionar un resumen fácilmente accesible de los métodos, datos y resultados de nuestra investigación sobre los costos de plantación y manejo de árboles, así como la rentabilidad de la inversión a partir de 2020, para muchas de las principales especies comerciales y regiones forestales e industriales del mundo. Esto puede ser útil para los inversores en madera y tierras forestales interesados en la industrialización, empresas y corporaciones con fines de lucro, organizaciones de manejo de inversiones en madera (TIMO), bosques comunitarios, familias, pequeños propietarios, contratistas, entidades indígenas, individuos u otras organizaciones. También es importante para los gobiernos nacionales, estatales o locales, así como para las organizaciones no gubernamentales (ONG), que buscan realizar inversiones rentables, para financiar los beneficios forestales de uso múltiple y sus programas y servicios gubernamentales y de conservación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Desde 2004, se ha colaborado periódicamente en la estimación y publicación de los costos y la rentabilidad de la inversión en madera para países seleccionados del mundo. Estos datos se recopilaban para diferentes especies y países cada tres años, inicialmente en Estados Unidos y Sudamérica, y posteriormente se ampliaron a varios países clave de todo el mundo. Esta información varió ligeramente según los contactos disponibles en los años seleccionados. La selección de las especies incluidas dependió de su importancia en el sector forestal de cada país y de la disponibilidad de datos en cada uno.



Se calcularon parámetros de referencia globales de inversión en tierras forestales para 16 países, 47 especies y diferentes regímenes manejo. Los costos, precios y rendimientos de la inversión se convirtieron a dólares estadounidenses (US\$) en cada país. Publicaciones previas sobre inversión forestal global han descrito los métodos de recopilación de datos, el flujo de caja y el análisis de capital empleados en esta investigación (Cubbage et al., 2022). En este trabajo se presentan las cifras al año 2023

Como referencia, se brinda a continuación un breve resumen sobre el análisis de capital basado en Cubbage et al. (2022). El Valor Actual Neto (VAN) convierte una serie de flujos de ingresos recurrentes en una sola cifra que permite comparar inversiones mutuamente excluyentes a una tasa de descuento determinada (costo de capital). Para decisiones de inversión individuales de aceptar o rechazar, los VAN positivos indican que se aceptaría la inversión; para seleccionar entre varios proyectos (análisis de capital), se elegiría la inversión con el mayor VAN positivo.

El Valor Futuro de la Tierra o Valor Futuro del Suelo (VFT o VFS) calcula el valor actual de una serie infinita de proyectos (rotaciones). El VFT se aplica de la misma manera que el VAN al tomar decisiones de inversión: las alternativas individuales con VFT positivos son aceptables, mientras que los VFT negativos no serían aceptables. De igual manera, el mayor VFT sería la alternativa preferida en una situación de análisis de capital, o para seleccionar entre diferentes alternativas de rotaciones forestales.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) se define como la tasa de descuento que iguala el valor actual de los ingresos del proyecto al valor actual de sus costos. Para inversiones individuales, la TIR suele compararse con cualquier tasa de retorno alternativa. Los proyectos alternativos con una TIR mayor que la tasa de retorno de referencia se consideran alternativas aceptables. En muchos proyectos, se prefieren TIR más altas en el análisis de capital.

Se calculó la TIR, el VPN y el VFT con una tasa de descuento real base (sin inflación) del 8 %, aplicados a todos los análisis y países desde que comenzó esta investigación en 2004. En teoría, con una tasa de descuento conocida, el VPN o el VFT se consideran los mejores criterios de presupuesto de capital.

La rentabilidad básica de la inversión no incluyó el precio de la tierra, cuyo monto varía considerablemente según el país y dentro de la mayoría de los países. De hecho, no es posible comprar tierras directamente en los países asiáticos relevantes, como China, India y Vietnam. Esto también es similar en otros países de Asia y África, al menos, pero en muchos países se pueden obtener arrendamientos de tierras a largo plazo del gobierno nacional, de las comunidades locales o a través de programas de subcontratación para producción de madera a nivel industrial. En consecuencia, no se realizaron análisis que incluyan el precio de la tierra. Nuestros análisis no incluyen los pagos de subsidios. Sin embargo, se recopilaron precios de compra de tierras o precios anuales de alquiler para la mayoría de los países. Muchas de las inversiones de propietarios privados y programas públicos se realizan donde los propietarios ya tienen la tenencia de la tierra, y la tierra puede no ser un costo relevante y no es necesario incluirla. Si se desea, para las nuevas compras e inversiones en tierras, los precios de la tierra podrían introducirse en los análisis y luego utilizarse para calcular los pagos totales por el valor de los bosques, la madera y los ecosistemas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Gráfico 1 se presentan los resultados de la TIR para las especies y países seleccionados para 2023. De acuerdo con estos resultados China, India y Vietnam tienen los mejores indicadores de TIR, con 18 % o más. Argentina, Brasil, Paraguay, Uruguay, Chile, España y Nueva Zelanda se encuentran en un segundo lote que supera el 9 % hasta 16 %. Las plantaciones y bosques templados en Estados Unidos y Europa, incluidas dos especies de España tuvieron una rentabilidad menor, entre el 3 % al 8 %.

Los costos de la madera por especie y país, con una tasa de descuento del 8 %, se muestran en el Gráfico 2. Estos costos totales simplemente muestran la suma de los costos reales para cada año en una rotación. En general, los costos promedio por m³ fueron relativamente bajos descontados al año cero. Los costos promedio de la madera fueron muy bajos en Argentina, Chile, Paraguay, India, Nueva Zelanda, Polonia y para las maderas duras del sur de EE. UU. La siguiente categoría, incluyó costos moderados para las maderas blandas en China, la mayoría de las especies en Colombia, las maderas



blandas en España y los eucaliptos en Uruguay. Los costos promedio de la madera superaron los \$10 por m³ en los eucaliptos de Brasil y España, el álamo en España y las maderas blandas en Finlandia. Los costos promedio más elevados de madera, de más de 20 dólares por m³, se registraron en la teca en Colombia y tanto en los eucaliptos como en la acacia en Vietnam.

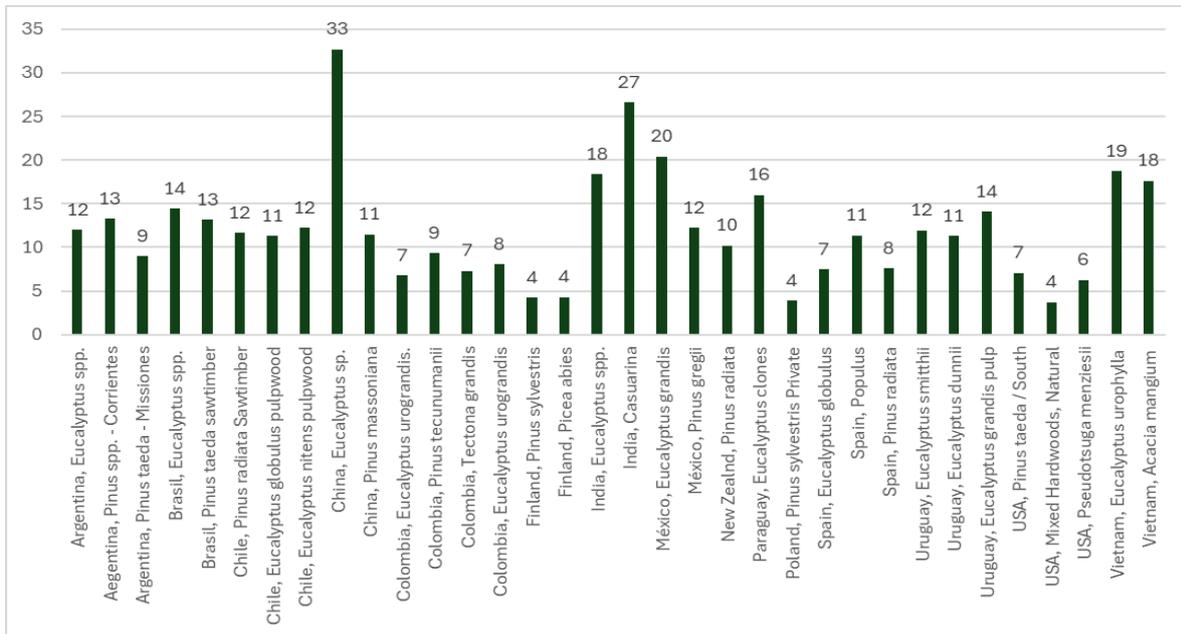


Gráfico 1. TIR para las especies y países seleccionados, 2023.

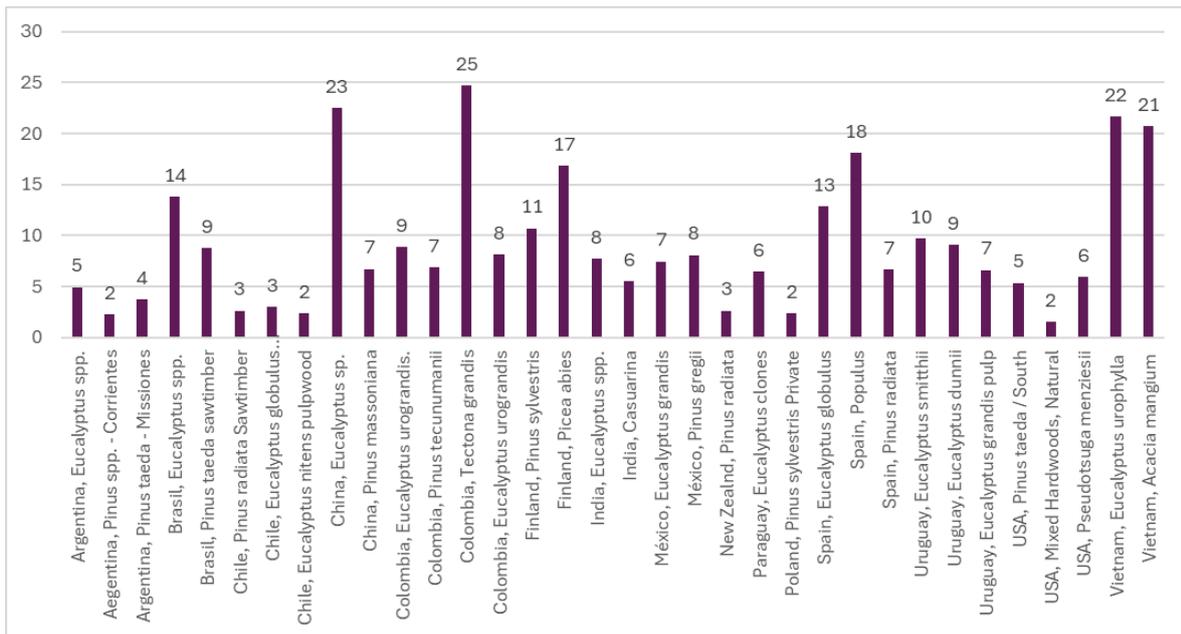


Gráfico 2. Costos de la madera en US\$ por m3 para las especies y los países seleccionados, 2023.

En general, los costos fueron relativamente bajos para generar almacenamiento de carbono forestal y compensar las emisiones globales de carbono. Estos bajos costos, si se emplean compensaciones de carbono forestal, benefician a la sociedad. El desafío radica, por supuesto, en lograr la aceptación y la presión social para el almacenamiento obligatorio de carbono en los mercados regulados o para el almacenamiento de carbono en los mercados voluntarios (Gráfico 3).

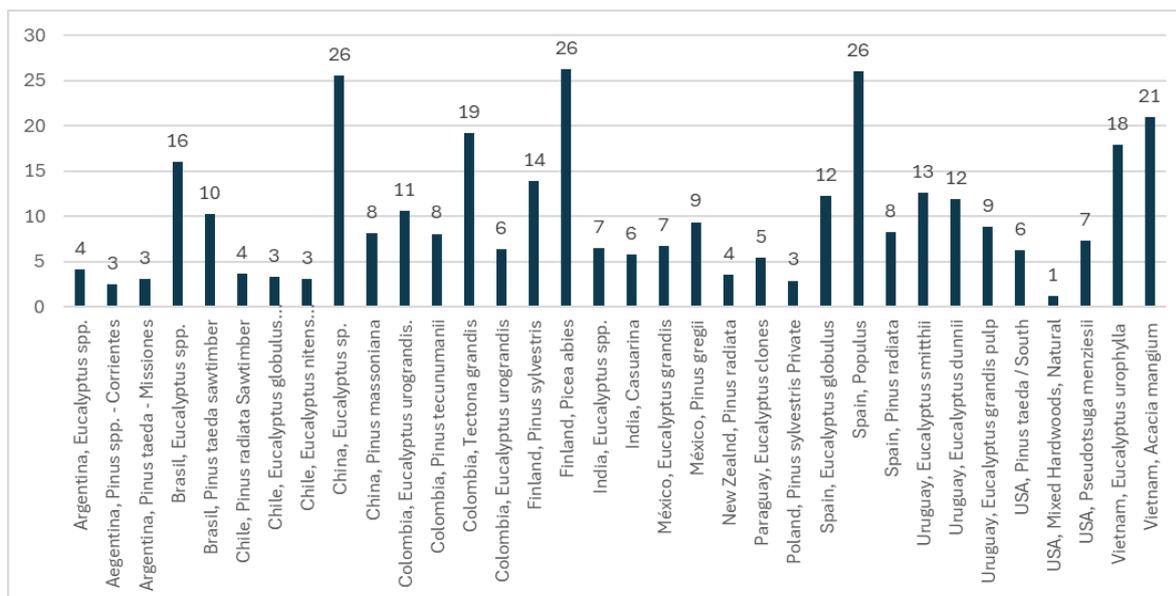


Gráfico 3. Costos del carbono forestal, US\$ por tonelada de CO₂eq por especie y país, con una tasa de descuento del 8 %, 2023.

4. CONCLUSIONES

La clasificación de la rentabilidad de la inversión en madera por país no siempre coincidió con el orden de los costos de producción de madera o los costos equivalentes de CO₂eq. Fue posible obtener TIR altas incluso con costos de insumos elevados, si los costos de la madera en pie también eran altos, como en Asia. Sin embargo, si los costos de establecimiento eran altos, los costos de producción de madera siguieron siendo elevados, como en Asia o Sudamérica. Los costos del carbono forestal por CO₂eq se aproximaron a los costos de producción de madera en valores numéricos, aunque para la métrica de CO₂eq el análisis es diferente.

Este análisis integrado de costos y rentabilidad de la inversión forestal, costos de producción de madera, y precios y costos de almacenamiento de carbono forestal proporcionan información pública útil para propietarios de tierras privadas y públicas, potenciales inversores en madera, empresas y consultores forestales, personal de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, e investigadores. Estos datos, correspondientes a muchos de los principales países productores de madera del mundo, ofrecen una amplia gama de información relativamente única sobre los costos globales de establecimiento de bosques, los precios de la madera y la rentabilidad de la inversión.

También es necesario combinar la rentabilidad a nivel de rodal con factores institucionales, políticos, macroeconómicos, de riesgo y otros factores para considerar los beneficios agregados de cualquier inversión individual en una especie o país. Estos datos pueden complementar otros datos sobre disponibilidad de tierras, oferta y demanda de madera, exportaciones e importaciones, leyes y regulaciones nacionales, política nacional, estabilidad y riesgo, entre otros, a la hora de tomar decisiones sobre inversión forestal o almacenamiento de carbono forestal.

5. LITERATURA CITADA

- BRANCALION, P.H.S.; CHAZDON, R.L. 2017. Beyond hectares: four principles to guide reforestation in the context of tropical forest and landscape restoration. *Restoration Ecology* 25(4): 491-496. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/rec.12519>.
- CHUDY, R.; CUBBAGE, F.W. 2021. Why Pension Plans and Net Zero Companies Should Consider Investing in Forestry. <https://caia.org/blog/2021/12/07/why-pension-plans-and-net-zero-companies-should-consider-investing-forestry>.
- 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. et al. 2022. Comparative global timber investment costs, returns, and applications, 2020. *J. For. Bus. Res.* 1(1):90-121.



SIMULACIÓN DE EVENTOS DISCRETOS (SED) PARA EVALUAR EL IMPACTO DEL TAMAÑO DE LOS FORWARDERS, LA CARGA ÚTIL, LA DISTANCIA DE EXTRACCIÓN Y EL TIPO DE PRODUCTO, EN LOS RENDIMIENTOS DE EXTRACCIÓN FORESTAL

Jonathan QUESNEL KIEFL¹; Andrés LESZCZUK²; Patricio MAC DONAGH³

RESUMEN

Existen *forwarders* de 10, 15 y 20 toneladas de carga, cuyos rendimientos y costos dependen del volumen de producción, la distancia de extracción y la carga por viaje. El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos (SED) para evaluar el impacto del tamaño de los *forwarders* sobre la productividad efectiva y la distancia óptima de extracción. Este permite la readecuación de las redes de caminos en un escenario con *forwarders* de 20 t. Para ello, se obtuvieron valores promedio, máximo, mínimo y desvíos estándar de productividad, en operaciones de raleo y tala rasa. Se clasificaron los *forwarders* de 15-18 toneladas como "medianos" y los de 20 toneladas como "grandes". Las productividades efectivas fueron de 40,9 m³/hora con distancias de extracción de 186,2 m para los *forwarders* grandes y 53,32 m³/hora con distancias de 188,12 m para los medianos. Se desarrollaron modelos lineales parciales para los tiempos por ciclo, los cuales fueron utilizados para generar simulaciones. Se ejecutaron 100 repeticiones y se compararon con datos empíricos, mostrando una correlación significativa. Las simulaciones demostraron que los *forwarders* de 20 toneladas fueron más productivos que los de 15-18 toneladas. Además, se evidenció que los mayores tiempos por ciclo correspondieron a carga y descarga.

Palabras clave: cosecha forestal, productividad, abastecimiento, harvester, pino

1. INTRODUCCIÓN

En las provincias de Misiones y Corrientes, el sistema de cosecha de madera más utilizado es el "corte a medida" (*Cut-to-length*), que se realiza con *harvester* y el *forwarder*. Estos últimos han evolucionado significativamente en las últimas décadas, pasando de tener una capacidad de carga de 10 toneladas hace 20 años, a 15-16 toneladas hace 10 años, y alcanzando actualmente capacidades de carga de 18-20 toneladas. Los rendimientos de la cosecha varían según la capacidad de carga de los equipos y las distancias óptimas de extracción (DOE), con rendimientos de hasta 12 m³/hora para *forwarders* de 10 toneladas y DOE de unos 100 metros, hasta 35 m³/hora para equipos de 15-16 toneladas y DOE de hasta 200 metros, y rendimientos superiores a 50 m³/hora en distancias mayores a 200 metros para equipos de 20 toneladas de carga (Nordfjell et al., 2019).

Los modelos de simulación son herramientas que permiten evaluar alternativas y tomar decisiones sobre la productividad y los costos de cosecha sin aplicarlos a sistemas reales, lo que representa menos costos y riesgos (Ackerman et al., 2016). Leszczuk et al. (2017a, b), emplearon un modelo de simulación estática para analizar la respuesta de un sistema de cosecha al efecto de las características del bosque, el número de máquinas y las horas trabajadas. Sin embargo, este enfoque no contempló el efecto del número de productos elaborados sobre los ciclos de extracción del *forwarder*, y no tuvo en cuenta la ocurrencia de demoras (roturas, lluvias, cambios en la planificación) que impactan en el flujo de madera entre las actividades, sobreestimando la productividad y subestimando el costo de cosecha (Asikainen, 2010).

¹ Ing. Ftal. jonathankiefl@hotmail.com

² Prof Adj. Ing. Ftal. FCF-UNaM leszczukandresalejandro@gmail.com

³ Prof. Titular Dr. FCF-UNaM patricio.macdonagh@gmail.com



Debido a que las operaciones en cosecha implican el manejo de productos a través de varias actividades interrelacionadas, la simulación de eventos discretos (SED) es una herramienta que permite construir modelos con mejores resultados que los modelos estáticos basados en planillas de cálculo (Asikainen, 2010), pues se toman en cuenta las actividades que conforman el sistema bajo estudio y agregan el factor de aleatoriedad a la simulación. Esta técnica se empleó para evaluar extracción en Suecia (Lundbäck et al. 2022), los procesos de desrame y trozado en sistemas *full-tree* (Hogg et al., 2010), en sistemas de cosecha, transporte, desrame y trozado *full-tree* (She et al., 2018), o analizando relaciones entre el proceso y transporte del aprovechamiento de tocones para bioenergía (Asikainen, 2010; Väätäinen et al., 2020).

Esta metodología proporciona una herramienta para generar simulaciones de indicadores de interés que se compararán con valores empíricos, permitiendo explorar escenarios y evaluar su impacto potencial en la toma de decisiones. Al combinar simulaciones y valores empíricos, se mejora el proceso de toma de decisiones.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar un modelo de simulación de eventos discretos (SED) que permitiera evaluar el impacto del tamaño de los *forwarders* de 15, 18 y 20 toneladas sobre la productividad efectiva y la distancia óptima de extracción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos para este trabajo se obtuvieron de bases de datos creadas a través de estudios de tiempos y rendimientos elaboradas en base a trabajos de Hildt et al. (2020) y en mediciones en operaciones de tala rasa. Todas las operaciones fueron realizadas en plantaciones de pinos de Corrientes y Misiones.

La metodología se compuso de tres etapas: a) composición de una base de datos unificada con *forwarders* de 15, 17, 18 y 20 t de carga, b) generación de modelos de tiempos lineales y distribuciones probabilísticas de las actividades por ciclo identificadas para grupos de *forwarders* con rendimientos estadísticamente similares; y c) simulación de eventos discretos (SED) para evaluar el impacto del tamaño de los *forwarders* en el abastecimiento.

La duración total del ciclo fue estimada como la suma de los tiempos insumidos en las distintas actividades parciales a través de la Ecuación 2. La productividad efectiva en cada ciclo fue estimada como el cociente entre el volumen transportado y el tiempo total insumido, esto mediante la Ecuación 3.

$$TTC[s]=TVVSC+TVVSL+TC+TMC+TVCSL+TVCSL+TD \quad (2)$$

$$PEF [m^3/(h.ef)]=VOL[m^3]*3600[s*h^{-1}]*[TTC]^{-1} [s] \quad (3)$$

Donde TTC es el tiempo total de ciclo, TVVSC es el tiempo de viaje vacío sobre el camino, TVVSL es el tiempo de viaje vacío sobre el lote, TC es el tiempo de carga, TMC es el tiempo de movimiento entre cargas, TVCSL es el tiempo de viaje cargado sobre el lote, TVCSC es el tiempo de viaje cargado sobre el camino, TD es el tiempo de descarga, PEF es la productividad efectiva y VOL es el volumen transportado del *forwarder*.

Los *forwarders* estudiados fueron categorizados en dos grupos, considerando el volumen total de carga y basándose en la premisa de que aquellos incluidos en cada grupo exhiben niveles de productividad estadísticamente similares. Los grupos resultantes fueron identificados como *forwarders* medianos, englobando a los de 15, 17 y 18 t de carga útil, y *forwarders* grandes, integrados exclusivamente por aquellos de 20 t de carga útil. Para realizar los análisis estadísticos y los modelos lineales se utilizó el software InfoStat en su versión estudiantil.

Se realizó una SED para comparar el impacto del tamaño del *forwarder* según su carga útil en los rendimientos de *forwarders* de 15, 17, 18 y 20 t, (Väätäinen et al., 2020). El software utilizado para crear la simulación fue el Rockwell Arena en su versión 16.20.00 estudiantil.

Se tuvieron en cuenta dos situaciones teóricas de extracción para cada tipo de *forwarder*: a) una situación en donde se presenta un volumen a extraer del rodal bajo, de 305,92 t, y b) una situación de volumen del rodal alto, de 4461,37 t. Dentro de cada una de las actividades se estimaron, con la



herramienta *Imput Analyzer* que incorpora el software, las distribuciones de probabilidad de los valores de las variables inherentes pertenecientes a cada una: distancia de viaje vacío sobre el camino, distancia de viaje vacío sobre el lote, volumen individual de trozas, volumen total de carga para ese ciclo, concentración de trozas, distancia de movimiento entre cargas, distancia de viaje cargado sobre el lote y distancia de viaje cargado sobre el camino.

La evaluación del ajuste se realizó a través de la prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrado, clasificando todas las distribuciones propuestas de acuerdo con sus p-valores, de mayor a menor. Un p-valor que superara 0,05 indica un ajuste adecuado, permitiendo que la distribución se incorpore en el modelo de simulación.

Para el caso del volumen individual de trozas se tuvieron en cuenta, tres tipos de productos: pulpable, aserrable y laminable. De estos se observaron el volumen de cada uno de ellos y su relación porcentual, procesándolos de igual manera que las demás variables y ajustando un modelo de distribución de probabilidad para cada uno.

De esta forma se construyeron bloques que representan a cada una de las actividades y que, en base a las distribuciones de probabilidad de las variables que ocupan cada una, otorgan el tiempo consumido para dicha actividad. Se realizaron 100 repeticiones de la simulación y se obtuvo una base de datos en formato de hoja de cálculo con los datos promedio de las actividades en todas las repeticiones. De manera simultánea, se calcularon y recolectaron las productividades de los *forwarders* para cada ciclo y cada repetición, así como las estimaciones de las variables de cada una de las actividades. Estos valores fueron contrastados con los valores empíricos obtenidos en la base de datos unificada a través de una prueba de Welch de comparaciones de medias que se realizaron de a pares.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan los *forwarders* estudiados con sus respectivas cargas útiles nominales y la cantidad de ciclos observados.

Cuadro 1. *Forwarders* estudiados con sus respectivas cargas útiles nominales, número de ciclos estudiados y tipo considerado.

Modelo	Carga útil [t]	N° Ciclos	Grupo de <i>forwarder</i>
John Deere 1510 E	15	70	Mediano
John Deere 1710 D	17	23	Mediano
Ponsse Buffalo King	18	18	Mediano
Ponsse Elephant King	20	31	Grande
John Deere 1910 G	20	51	Grande

En el Cuadro 2 se presenta un resumen de los valores de productividad efectiva media, distancia de extracción media y número de ciclos contados para cada grupo, las letras indican el resultado que arrojó la prueba de Tukey con un $\alpha = 0,05$.

Cuadro 1. Diferencia de medias (Tukey) de la Productividad efectiva, la Distancia de extracción y número de ciclos de *forwarders* medianos y grandes, en base a datos empíricos.

Grupo de <i>forwarder</i>	PEF media [m ³ /h]	DE media [m]	Número de ciclos
Mediano	40,9 ± 16,69 ^a	186,2 ± 128,91 ^a	108
Grande	53,32 ± 17,28 ^b	188,12 ± 91,21 ^a	82

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

Se puede ver que los *forwarders* grandes tienen productividades efectivas mayores, por otro lado, no se observan diferencias significativas entre las distancias de extracción, presentando la misma letra de significancia.



En el Cuadro 3 se presentan los valores de productividad efectiva y distancia de extracción promedio obtenidos a partir de las simulaciones, junto con un análisis de comparación de medias de a pares utilizando una prueba t de Welch. Esta prueba es apropiada para comparar las medias de dos grupos independientes con varianzas desiguales.

Cuadro 3. Comparación de medias (Welch) de la productividad efectiva, la distancia de extracción y número de ciclos de forwarders medianos y grandes provenientes de las simulaciones, teniendo en cuenta el volumen inicial de madera a extraer.

Volumen inicial a extraer	Grupo de forwarder	PEF media [m ³ /h]	DE media [m]	Número de ciclos
Alto	Mediano	42,57 ± 13,08 ^a	199,37 ± 121,44 ^a	100
Alto	Grande	48,49 ± 15,79 ^b	198,70 ± 91,16 ^a	100
Bajo	Mediano	41,88 ± 11,42 ^a	200,99 ± 99,14 ^a	100
Bajo	Grande	47,26 ± 12,96 ^b	197,02 ± 74,10 ^a	100

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

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas han mostrado una notable consistencia con los datos empíricos obtenidos a través de mediciones a campo. Este hallazgo resalta la efectividad de las metodologías empleadas, las cuales permitieron observar claramente el impacto que tiene el tamaño de los *forwarders* en las diferentes actividades que componen el ciclo operacional de extracción de madera. Este tipo de análisis es fundamental para la toma de decisiones informadas y para la optimización de los recursos en el proceso de cosecha.

Las simulaciones de eventos discretos se han aplicado de manera efectiva, permitiendo ajustar distribuciones estadísticas para cada uno de los componentes del ciclo de extracción. Esto facilitó la generación de simulaciones precisas utilizando el software correspondiente.

En cuanto a los *forwarders*, se pudo comprobar que aquellos con mayor capacidad de carga (de 20 toneladas) presentan una mayor productividad efectiva en todos los análisis realizados. Este hallazgo es consistente independientemente del volumen inicial de madera a extraer o de la distancia de extracción. Este resultado sugiere que, en términos de productividad, los *forwarders* grandes son más eficientes que los de menor capacidad.

En relación con la distancia de extracción, se observó que no hubo una variación significativa en los resultados al comparar los diferentes tipos de *forwarders*. Esto sugiere que, en condiciones similares, la elección entre *forwarders* grandes (de 20 t de capacidad) y medianos (de 15 a 18 t de capacidad) puede ser indiferente en términos de su desempeño, lo que implica que ambos tipos de maquinaria pueden ser empleados de manera efectiva bajo las mismas condiciones operativas.

Un análisis más profundo que compare, además de los tamaños, diferentes marcas de *forwarders* podría resultar altamente beneficioso. Este enfoque permitiría obtener resultados aún más precisos y detallados, contribuyendo a una mejor comprensión de las variaciones en el rendimiento y eficiencia de las máquinas. La inclusión de marcas diferentes permitiría evaluar cómo factores como la tecnología, diseño y características específicas de cada modelo influyen en la productividad y costos operativos, lo que podría ofrecer una ventaja significativa para optimizar las decisiones en el ámbito de la cosecha forestal.

5. LITERATURA CITADA

ACKERMAN, S.A.; SEIFERT, S.; ACKERMAN, P.A.; SEIFERT, T. 2016. Mechanised Pine Thinning Harvesting Simulation: Productivity and Cost Improvements as a Result of Changes in Planting Geometry. *Croat. j. for. eng.* 37(1): 1-15.



- ASIKAINEN, A. 2010. Simulation of stump crushing and truck transport of chips. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 25(3): 245-250.
- HILDT, E.; LESZCZUK, A.; MAC DONAGH, P.; SCHLICHTER, T. 2020. Time consumption analysis of forwarder activities in thinning. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 41(1): 13-24.
- HOGG, G.; PULKKI, R. E.; ACKERMAN, P. A. 2010. Multi-Stem Mechanized Harvesting Operation Analysis – Application of Arena 9 Discrete-event Simulation Software in Zululand, South Africa. *International Journal of Forest Engineering*, 21(2): 14-22.
- LESZCZUK, A.; HILDT, E.; SOMMA, F.; BROZ, D.; CAPIEL, I., TORRUBIANO, C.; MAC DONAGH, P. 2017a. Simulador de Cosecha Forestal “SimNEA”. Congreso argentino de agroinformática – 46JAIIO. En actas 4-8 sep. 2017. ISSN: 2525-0949 – P 194-204.
- LESZCZUK, A.; HILDT, E.; CINAUSKI, R.; REIS, H.; SCHERER, R.; KIMMICH, D.; SOMMA, F.; MAC DONAGH, P. 2017b. Planificación y balance de operaciones de cosecha utilizando el simulador “SIMNEA”. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos. En actas 5 – 6 oct. 2017. ISSN: 2469-0147 – 5p.
- LUNDBÄCK MIKAEL, CAROLA HÄGGSTRÖM, DAG FJELD, OLA LINDROOS & TOMAS NORDFJELL (2022): The economic potential of semi-automated tele-extraction of roundwood in Sweden, *International Journal of Forest Engineering*, DOI: 10.1080/14942119.2022.2103784
- NORDFJELL, T.; ÖHMAN, E.; LINDROOS, O.; BENGT AGER. 2019. The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017, *International Journal of Forest Engineering*, 30:1, 1-13, DOI: 10.1080/14942119.2019.1591074
- SHE, J., CHUNG, W. & KIM, W. 2018. “Discrete-event simulation of ground-based timber harvesting operations,” *Forests*, vol. 9, n°. 11.
- VÄÄTÄINEN KARI, JUHA LAITILA, PERTTU ANTTILA, ANTTI KILPELÄINEN & ANTTI ASIKAINEN. 2020. The influence of gross vehicle weight (GVW) and transport distance on timber trucking performance indicators – Discrete event simulation case study in Central Finland, *International Journal of Forest Engineering*, 31:2, 156-170, DOI: 10.1080/14942119.2020.1757324



PRIMEROS AVANCES EN LA HUELLA DE CARBONO DE LA COSECHA DE MADERA

Patricio MAC DONAGH¹; Danilo SIMOES²; Alejandro OLIVERA³; Eduardo LOPES⁴; Julio ARCE⁵

RESUMEN

La estimación de la huella de carbono de la cosecha de madera requiere un análisis integrado del manejo y de las operaciones forestales para obtener predicciones de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). La principal fuente de emisiones de CO₂ proviene de la combustión de los motores. Las plantaciones pueden optimizar el almacenamiento de carbono, pero deben equilibrarse con la minimización de las emisiones GEI. Modelar estos sistemas permitirá disponer de información para aumentar la cantidad neta de carbono almacenado. Los principales factores que influyen en el consumo de combustible son el peso, la capacidad de carga y la potencia. Se creó una base de datos de plantaciones de Argentina, Brasil y Uruguay con especies, tipos de manejo y maquinaria. Se modeló la productividad de las máquinas, se relacionó con los sistemas de manejo y se calcularon el consumo de combustible y las emisiones de CO₂. Se presentan los resultados preliminares de Argentina, en operaciones CTL en eucaliptos y pinos. Se analizaron los parámetros de las máquinas, considerando el volumen del fuste y la distancia de extracción como los principales factores que influyen en las emisiones de CO₂. Los valores de CO₂eq se situaron en 2,14 Kg*m⁻³ para *Harvesters* y en 2,09 Kg*m⁻³ para *Forwarders*.

Palabras clave: *Plantaciones forestales, emisiones de CO₂, maquinaria forestal*

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales almacenan más del 80 % de todo el C terrestre sobre el suelo y más del 70 % de todo C orgánico del suelo. Como consecuencia, las concentraciones cada vez mayores de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera han resaltado la importancia de los bosques como agentes de mitigación. El intercambio anual de CO₂ entre los bosques y la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración representan aproximadamente 50×10¹² kg de C por año, aproximadamente 7 veces la causada por fuentes antropogénicas. En consecuencia, los bosques se consideran sumamente importantes para limitar el aumento del dióxido de carbono atmosférico, ya que los árboles capturan cantidades sustanciales de carbono de la atmósfera y con ello mitigar el efecto invernadero.

La principal fuente de CO₂ en las operaciones forestales resulta de la combustión del motor de las máquinas. Las emisiones de CO₂ en las operaciones de cosecha forestal están también influenciadas por las condiciones del rodal y del terreno, las especies, los métodos de manejo, el desempeño del operador, y las limitaciones o el diseño de la maquinaria. Estas emisiones están presentes en cualquiera de los sistemas de cosecha mecanizados (Haavikko et al., 2022; Cosola et al., 2016; Eliasson et al., 2023; Kärhä et al., 2023).

Por lo tanto, con la creciente mecanización de las operaciones forestales se puede esperar que las emisiones puedan incrementarse, a pesar de que las actividades forestales no tienden a emitir grandes cantidades de gases de efecto invernadero (GEI).

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

² Prof. Dr. Faculdade de Ciências Agrárias, UNESP, Botucatu, Brasil. danilo.simoes@unesp.br

³ Prof. Dr. CUT, Universidad de la República, Uruguay, alejandrolivera@cut.edu.uy

⁴ Prof. Dr. DEF-UNICENTRO, Paraná, Brasil. eslopes@unicentro.br

⁵ Prof. Dr. DCF, UFPR, Curitiba, Paraná, Brasil. jarce@ufpr.br



De esta forma, es necesario mejorar la eficiencia energética en todas las empresas, y conseguir un conocimiento más preciso para los esquemas de certificación forestal. Por ejemplo, información confiable sobre el consumo de combustible y sobre las emisiones de GEI.

Para evaluar las emisiones de GEI, hay que transformar los datos de consumo de combustible en lo que se denomina CO_2eq . El CO_2 es el principal gas que componen las emisiones, que alcanza más del 80 % del total de los gases que se emiten cuando combustiona un motor.

Finalmente, la eficiencia energética de las operaciones forestales es un concepto que balancea entre el carbono fijado por el crecimiento de las plantaciones forestales y el emitido por las cosechas de madera.

Hasta el momento son muy pocos los estudios que se han realizado en conjunto para los principales países productores de plantaciones forestales: Mac Donagh et al. (2017); Mac Donagh et al. (2019); Hildt et al. (2022); Cabbage et al. (2020); Cabbage et al. (2022). Con lo cual, esta propuesta es única y se convertirá en un avance en la sustentabilidad de las plantaciones forestales de América del Sur.

En este contexto será una contribución a la sustentabilidad forestal, a través de la disminución de la emisión de GEI, por medio de la mejora del balance energético de las plantaciones forestales. En este sentido se intentará contribuir a la evaluación detallada, y a la modelización de la etapa de mayor impacto ambiental del ciclo de las plantaciones forestales (Haavikko et al., 2022; Eliasson et al., 2023; Kärhä et al., 2023). De esta manera, se contribuirá de forma científica a análisis más globales como el balance de carbono de las regiones bajo estudio, y de la actividad forestal en sí misma. La hipótesis general se relaciona con la correcta asignación de las máquinas de cosecha a las operaciones, no solo desde el punto de vista del tamaño y la potencia, sino desde la eficiencia energética de las operaciones antes mencionadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este proyecto se abordan los sistemas de cosecha mecanizados de plantaciones forestales de Argentina, Brasil, y Uruguay, que incluyen tanto el sistema de corte a medida (CTL) como el de árbol completo (FT).

De una manera general, la metodología a implementar en este proyecto se puede esquematizar en la Figura 1, propuesta por Haavikko et al. (2022).



Los procedimientos realizados fueron:

Se compuso una base de datos común entre las empresas que aportaron datos. Estas fueron 8 empresas de Argentina, 2 de Brasil, y 10 de Uruguay. Las empresas aportaron datos mensuales de producción, consumo de combustible, horas de trabajo y variables silviculturales de las máquinas por frente de trabajo. En este trabajo se presentan los resultados preliminares de Argentina, provenientes de cuatro contratistas y una empresa integrada. Todas las empresas trabajaban en plantaciones de pino. Esto significó once modelos de *harvesters* y cinco de *forwarders*. La muestra abarca entonces 106 datos de *harvesters* y 95 de *forwarders*.

Se empleó el paquete GAMLSS en R Studio para realizar el análisis estadístico (Stasinopoulos et al., 2008; Marmolejo Ramos et al., 2021). GAMLSS es un paquete estadístico semi paramétrico flexible que extiende los modelos lineales generalizados (GLM) y aditivos (GAM) tradicionales más allá de la familia exponencial. GAMLSS permite el modelado implícito de todos los parámetros de la distribución de la variable de respuesta como funciones (no) lineales o suavizadas de las variables explicativas (Benedetti et al., 2024; de Oliveira y Velazco, 2025).

Para comprender el comportamiento de cada variable predicha, se eligió la distribución que mejor se ajustaba, utilizando el criterio AIC.



En segundo lugar, con el paquete GAMLSS en R Studio se compararon cuatro tipos de modelos: el modelo lineal (LM), el GLM, el GAM y, finalmente, el modelo GAMLSS (R v4.4.0, R Core Team, 2024). El primer modelo ajustado fue un modelo lineal (LM) que asume una distribución normal de la variable de respuesta y modela únicamente la media de la distribución en función de los predictores. El segundo modelo ajustado fue un modelo general de gamma (GLM), que introduce el uso de una distribución gamma en lugar de una distribución normal. El tercer modelo fue el modelo aditivo de gamma (GAM) no lineal. Finalmente, el cuarto modelo fue el modelo aditivo generalizado para posición, escala y forma (GAMLSS). En los cuatro modelos, la variable de respuesta sigue una distribución gamma, la relación con los predictores es no lineal y todos los parámetros de la distribución se modelan en función de los predictores, no solo de la media (Rodrigo, 2020).

Las variables de respuesta estudiadas fueron la productividad por hora efectiva (PMH), y el consumo de combustible tanto en litros por hora (CCLH) como en litros por tonelada (CCLT).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan los resultados para los *harvesters* y los *forwarders* evaluados, en lo que se refiere a PMH y consumo de combustible. Estas operaciones se realizaron en plantaciones de *Pinus* sp. en Misiones y Corrientes, en un rango muy amplio de situaciones. Los volúmenes individuales de los árboles se situaron en 0,69 m³ (DE 0,31), y las distancias de extracción fueron 214,8 m (DE 156,7).

Cuadro 1. Resultados de *harvesters* y *forwarders* para PMH y consumo de combustible.

	Harvesters			Forwarders		
	PMH	CCLH	CCLT	PMH	CCLH	CCLT
Min.	6,50	5,05	0,19	4,04	1,32	0,08
1st Qu	19,55	16,89	0,5	13,62	13,06	0,57
Mediana	28,32	19,6	0,65	14,5	14,5	0,73
Promedio	30,75	19,35	0,8	14,43	14,4	0,78
3rd Qu.	36,35	22	0,9	16,32	16,32	1,01
Max.	92,19	39,45	2,76	23,26	23,26	2,66

Donde: PMH productividad efectiva en metros cúbicos por hora, CCLH consumo de combustible en litros por hora, CCLT consumo de combustible en litros por tonelada.

Todas las variables predichas no fueron normales en las pruebas de Shapiro, Kruskal Wallis, ni en los gráficos Qqplot.

De acuerdo con los criterios AIC, para los *harvesters* los datos de PMH tuvieron su mejor ajuste con una distribución Gamma, para CCLH fue una distribución Normal, y para CCLT fue LogNormal. Ya en el caso de los *forwarders*, el mejor ajuste de PMH fue para una distribución Gamma, para CCLH fue una distribución Normal, y para CCLT una distribución LogNormal.

En los *harvesters* el mejor modelo para PMH fue el GAMLSS, con las variables volumen individual del fuste, la potencia y el número de productos como variables significativas. Para CCLH el mejor modelo fue el GAMLSS, con las variables horas totales de la máquina, número de productos y la relación peso potencia como significativas. Para CCLT el mejor modelo fue el GAMLSS con las variables volumen de fuste, horas totales de la máquina y potencia como significativas.

En el caso de los *forwarders*, el mejor modelo para PMH fue el GAM, con las variables distancia de extracción, relación peso potencia, y número de productos como significativas. Para CCLH el mejor modelo fue el GAMLSS, con las variables distancia de extracción, potencia y número de productos como significativas. Para CCLT el mejor modelo fue GAM, con las variables distancia de extracción, horas totales de la máquina y la relación peso potencia.

A continuación, se presentan los mejores modelos para PMH, CCLH y CCLT para *harvesters* y *forwarders*: Solo se muestran los modelos de ecuaciones y no las ecuaciones finales para preservar la publicación en revistas científicas.



$$\text{PMHHV} = a^{***} + b^* \text{pb}(\text{Vol}^{***}) - c^* e^{-0.1 \text{pb}(\text{Vol}^{2***})} - d^* e^{-0.05(\text{Potencia}^{**})} + d^* e^{-0.02(\text{Productos})} \quad (1)$$

$$\text{CCLHHV} = a^{***} - b^* e^{-0.06 \text{pb}(\text{HM})} + c^* e^{2 \text{Productos}^{**}} + d^* e^{-0.1 \text{P/P}^{***}} \quad (2)$$

$$\text{CCLTHV} = a^* e^{-3} - b^* e^{-0.1 \text{pb}(\text{Vol}-1)^{***}} + c^* e^{-5 \text{pb}(\text{HM})^{**}} + c^* e^{-3 \text{Potencia}^{***}} \quad (3)$$

$$\text{PMHFW} = a^{**} + b^* \text{pb}(\text{DE}^*) - d^* \text{P/P}^{**} + f^* \text{Productos} \quad (4)$$

$$\text{CCLHFW} = -a - b^* \text{pb}(\text{DE}^*) + c^* \text{Potencia}^{***} - f^* \text{Productos} \quad (5)$$

$$\text{CCLTFW} = -a - b^* e^{-4(\text{DE})^{**}} + c^* e^{-5(\text{HM})^*} + d^* \text{P/P} \quad (6)$$

Donde: PMHHV: productividad por hora de los *Harvesters*, CCLHHV: consumo de combustible en litros por hora para *Harvesters*; CCLTHV consumo de combustible en litros por tonelada para *Harvesters*; PMHFW: productividad por hora para *Forwarders*; CCLHFW: consumo de combustible en litros por hora para *Forwarders*; CCLTFW consumo de combustible para *Forwarders*, Vol= volumen del fuste, DE distancia de extracción, HM, horas totales de la máquina, P/P= relación Peso Potencia. Productos, número de productos. pb: transformación que se aplica en GAMLSS para modelar relaciones no lineales de manera flexible. Los exponentes denotan la cantidad de decimales. *** altamente significativo 0,0001, ** significativo 0,01, * significativo 0,05. a,b,c,d,f constantes de los modelos.

En lo que respecta a los valores de emisiones promedio de CO₂Eq (Kg*m⁻³): para *harvesters* fueron de 2,14 y para *forwarders* fueron de 2,09 (Haavikko et al., 2022; Eliasson et al., 2023; Kärhä et al., 2024)

Desarrollar este proyecto en tres países de Sudamérica para un solo investigador supone un gran reto. Por estas razones, es fundamental contar con socios como los que acompañan esta publicación. Diferentes países con diferentes empresas gestionan la información sobre la cosecha de diversas maneras.

Las plantaciones forestales de rápido crecimiento del Cono Sur marcan la diferencia en huella de carbono cuando se las compara con países del hemisferio norte. Por ejemplo, situaciones de alta demanda de madera, operadores calificados con maquinaria de alta tecnología tienen una mayor productividad que países del hemisferio norte.

Las emisiones de CO₂Eq (kg*m⁻³) para Haavikko et al. (2022) fueron de 4,26 y para Kärhä et al. (2024) fueron de 4,93. En este primer enfoque, las emisiones fueron de 4,22 kg*m₃. En este contexto se prevé un menor CO₂Eq en Brasil, y Uruguay, por poseer todavía más altos rendimientos que los analizados en esta primera entrega.

En las próximas entregas de este proyecto se podrán presentar los resultados comparativos de los países participantes, y con ello avanzar sobre la hipótesis general referida a las diferencias en huella de carbono en plantaciones forestales de alto rendimiento con tecnología de punta en la cosecha forestal.

4. CONCLUSIONES

En un contexto de sustentabilidad forestal, y de alta presión social sobre el sector, es muy importante señalar los beneficios de las plantaciones forestales. Poder modelar las emisiones de GEI de la cosecha de madera permite adecuar eficientemente la fijación de CO₂ de las plantaciones, y entonces modelar el óptimo balance energético de estas.

El empleo del paquete GAMLSS ha permitido modelar variables que tenían un comportamiento no normal, y adecuar correctamente las relaciones entre las variables predictoras y las predichas. Esta es una metodología estadística novedosa y superadora de las tradicionales transformaciones para poder emplear modelos lineales y/o mixtos. Es una metodología de reciente aplicación en el sector forestal, pero que en este caso ha dado resultados satisfactorios.

La vinculación de los predictores forestales clásicos, con variables como potencia, relación peso-potencia y horas totales de las máquinas demuestra la importancia del abordaje integrado de la modelización del CO₂eq.



Aunque los resultados sean preliminares, queda demostrada la importancia de la productividad como parámetro determinante de las operaciones forestales con alto nivel de mecanización. Los resultados presentados muestran PMH bajas si se comparan con valores de PMH para operaciones en plantaciones en Uruguay y en Brasil. Al emplear las mismas máquinas y operar en condiciones similares, la productividad de los operadores juega un rol preponderante. En este contexto, la capacitación de los operadores es el factor más importante cuando se comparan máquinas de alto nivel tecnológico.

5. LITERATURA CITADA

- BENEDETTI, Y.; MORELLI, F.; SVITOK, M.; SANTOLINI, R.; KADLECOVÁ, P.; CAVALLI, A.; MUNAFÒ, M. 2024. Identifying Landscape Characteristics That Maximize Ecosystem Services Provision. *Sustainability* 16(21), 9461.
- COSOLA, G.; GRIGOLATO, S.; ACKERMAN, P.; MONTEROTTI, S.; CAVALLI, R. 2016. Carbon footprint of forest operations under different management regimes. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 37(1): 201-217.
- CUBBAGE, F.; KANIESKI, B.; RUBILAR, R.; BUSSONI, A.; OLMOS, V. M.; BALMELLI, G.; ABT, R. 2020. Global timber investments, 2005 to 2017. *Forest Policy and Economics* 112, 102082.
- CUBBAGE, F.; RUBILAR, R.; MAC DONAGH, P.; DA SILVA, B. K.; BUSSONI, A.; MORALES, V.; CUBAS-BAEZ, A. 2022. Comparative global timber investment costs, returns, and applications, 2020. *Journal of Forest Business Research* 1(1): 90-121.
- de OLIVEIRA JUNIOR, A. C.; VELAZCO, S. J. E. 2025. adm: An R package for constructing abundance-based species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution* 16: 1404–1412. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.70074>
- ELIASSON, L.; KÄRHÄ, K.; ARLINGER, J. 2023. Fuel consumption in logging operations in Sweden. *International Journal of Forest Engineering*, 34(3): 366-372.
- HAAVIKKO, H.; KÄRHÄ, K.; POIKELA, A.; KORVENRANTA, M.; PALANDER, T. 2022. Fuel consumption, greenhouse gas emissions, and energy efficiency of wood-harvesting operations: A case study of Stora Enso in Finland. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 43(1): 79-97.
- HILDT, E.; BUSSONI, A.; MORALES OLMOS, V.; MAC DONAGH, P. M.; CUBBAGE, F. W. 2022. Pine Log Price Changes in South America: A Comparison of Argentina, Brazil, and Uruguay Markets. *Journal of Forest Economics* 37: 217-236. DOI 10.1561/112.00000555.
- KÄRHÄ, K., HAAVIKKO, H., KÄÄRIÄINEN, H., PALANDER, T., ELIASSON, L., & ROININEN, K. 2023. Fossil-fuel consumption and CO₂eq emissions of cut-to-length industrial roundwood logging operations in Finland. *European Journal of Forest Research* 142(3): 547-563. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.615>
- MAC DONAGH, P. M.; 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.
- MAC DONAGH, P.M.; 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. *Forest* 10(69): 1-12.
- MARMOLEJO-RAMOS, F.; TEJO, M.; BRABEC, M.; KUZILEK, J.; JOKSIMOVIC, S.; KOVANOVIC, V.; OSPINA, R. 2023. Distributional regression modeling via generalized additive models for location, scale, and shape: An overview through a data set from learning analytics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery* 13(1), e1479.
- R CORE TEAM, 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RODRIGO, J. 2020. GAMLSS: modelos aditivos generalizados para posición, escala y forma. Accessed at https://github.com/JoaquinAmatRodrigo/Estadistica-con-R/tree/master/PDF_format
- STASINOPOULOS, M.; RIGBY, B.; AKANTZILIOTOU, C. 2008. Instructions on how to use the gamlss package in R Second Edition.



MODELO DE PLANIFICACIÓN FORESTAL ESTRATÉGICA A ESCALA PROVINCIAL

Mathias Isaac LÓPEZ¹; Diego Ricardo BROZ¹; Patricio Miguel MAC DONAGH²; Julio Eduardo ARCE³; Enzo Martín SANZOVO²

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de planificación forestal estratégica en términos espaciales y temporales, diseñado para armonizar la producción primaria con las capacidades industriales de la provincia de Misiones. Se integraron datos del inventario forestal y del censo foresto industrial en el software de optimización Optimber LP, utilizando funciones de crecimiento simuladas y prescripciones de manejo variables. El objetivo fue estabilizar el volumen anual de producción de madera, minimizando la diferencia entre los valores máximos y mínimos durante un horizonte de planificación de 30 años. Los resultados muestran que, ante un consumo industrial constante, es necesario un aprovechamiento intensivo inicial de plantaciones envejecidas para luego alcanzar un equilibrio productivo sostenible. El modelo permite identificar excedentes por región y género y proyecta superficies óptimas de tala rasa y raleo. Se concluye que esta herramienta contribuye a diseñar políticas públicas que promuevan un uso eficiente del recurso forestal, evitando excedentes no aprovechados y fortaleciendo el vínculo entre oferta y demanda. La planificación estratégica territorial, basada en optimización matemática, se presenta como un enfoque clave para el desarrollo sostenible del sector foresto industrial de Misiones.

Palabras clave: *Planificación espacio-temporal, optimización forestal, modelos matemáticos, producción sostenible*

1. INTRODUCCIÓN

La economía de Misiones depende fuertemente de la agricultura y, principalmente, de la producción forestal basada en plantaciones de rápido crecimiento. Izquierdo et al. (2011) destacan que la industria forestal ha sido clave para el desarrollo económico, contribuyendo significativamente al producto bruto geográfico (PBG) provincial. La gestión sostenible de los recursos requiere planificación efectiva que asegure su uso y conservación (Broz et al., 2022; Piedra-Gimenez et al., 2025).

La planificación forestal se desarrolla en tres niveles: operativa, táctica y estratégica, cada uno con objetivos y alcances propios (Bettinger et al., 2017). La planificación estratégica, con horizontes de 10 a 50 años, establece objetivos generales para decisiones de largo plazo, considerando cambio climático, biodiversidad y políticas públicas (Buongiorno y Gillies, 2003). Según Pretzsch (2009), debe integrar enfoques interdisciplinarios para diseñar estrategias resilientes y adaptativas.

Los modelos matemáticos de optimización son herramientas clave para la gestión forestal, resolviendo problemas complejos como la planificación de cosechas, asignación de recursos y evaluación de sostenibilidad (Bettinger et al., 2017; Rönnqvist et al., 2015). Gilmore y Gomory (1961) introdujeron la Programación Lineal (PL) en el troceado de fustes, y Curtis (1962) la aplicó al manejo forestal.

En décadas recientes se multiplicaron modelos para producción primaria y aspectos ambientales (Nabhani et al., 2024; Dong et al., 2021; Luo et al., 2024; Marques et al., 2021), aunque son pocos los que integran la dimensión industrial, considerando demanda, distancias, red vial y tipología industrial

¹ FCF, UNaM - CONICET. mathias.lopez@fcf.unam.edu.ar

² FCF, UNaM

³ UFPR



(Broz et al., 2016; Yoshimoto y Konoshima, 2016; Álvarez-Miranda et al., 2018; Demirci et al., 2020; Quintero-Méndez y Jerez-Rico, 2017; Huang et al., 2019).

En América Latina, Banhara et al. (2010) aplicaron PL Entera Mixta para mejorar cosechas de *Eucalyptus*; Belavenutti Martins da Silva (2015) optimizó la red vial; Pereira (2016) desarrolló modelos tácticos de cosecha; David et al. (2017) seleccionaron regímenes de manejo de *Pinus taeda*; otros abordaron raleo (Castillo Edua y Mendoza, 2018), programación de cosecha (Céspedes, 2018) y estabilización de producción flexibilizando la edad de corta (Broz et al., 2021; 2022).

Pese a estos avances, no existen modelos a escala provincial o regional como herramienta de política pública. La planificación estratégica provincial debe integrar distribución espacial de plantaciones, diversidad industrial, cuencas forestales y especies predominantes. Este trabajo propone un modelo estratégico provincial, con datos SIFIP y Optimber LP, para evaluar políticas, proyectar necesidades industriales y apoyar el desarrollo territorial y forestoindustrial sostenible.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se llevó a cabo en la provincia de Misiones, Argentina, cuya economía depende significativamente de la producción forestal basada en plantaciones de rápido crecimiento. La planificación forestal estratégica, que se extiende entre 10 y 50 años, establece objetivos generales para orientar decisiones a largo plazo, integrando enfoques interdisciplinarios para diseñar estrategias resilientes y adaptativas. Los modelos matemáticos de optimización, como la Programación Lineal, son herramientas fundamentales en la gestión forestal para problemas complejos como la planificación de cosechas y la asignación eficiente de recursos.

Para el desarrollo del modelo, se utilizaron dos fuentes principales de datos. Por un lado, la demanda maderera industrial y, por otro, la oferta de madera e inventario forestal a escala provincial. La demanda anual de madera de las industrias provinciales se obtuvo mediante encuestas realizadas en el censo provincial de forestoindustrias entre los años 2020 y 2021. Se determinó una demanda total de 7.149.605 m³/año. De este volumen, el 74,1 % corresponde a *Pinus*, el 10,9 % a *Eucalyptus*, el 1,5 % a *Araucaria* y el 13,5 % a otras especies. En cuanto a los productos, el 68,1 % son aserrables y el 31,9 % pulpables. Por otra parte, la información sobre la oferta de madera se derivó del procesamiento de imágenes satelitales, cuya validación se realizó a través del inventario forestal del proyecto SIFIP. Este procesamiento permitió determinar la superficie y las clases de edad de los géneros implantados predominantes, incluyendo *Pinus*, *Eucalyptus*, *Araucaria* y otras especies implantadas (*Toona*, *Paulownia*, *Grevillea*, *Melia*). La superficie forestal provincial total identificada es de 356.708 ha. La distribución de esta superficie por clases utilizada para realizar la planificación tiene la siguiente estructura: 12 % entre 0 y 5 años, 8 % entre 5 y 10 años, 34 % entre 10 y 15 años, 27 % entre 15 y 20 años, y 19 % más de 20 años. Además, se incorporó una composición espacial por departamento para poder analizar la distribución de las plantaciones en la región (Gráfico 1).

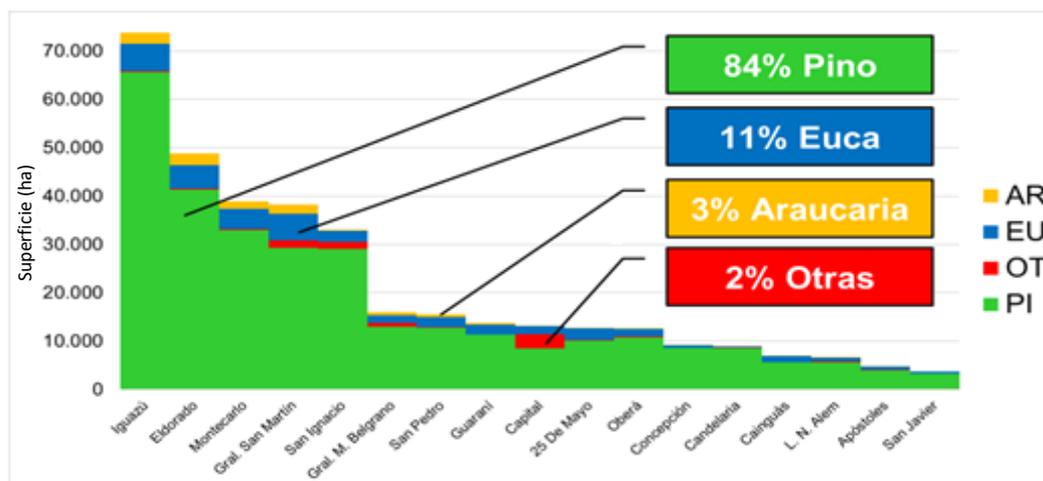


Gráfico 1. Superficie por género y departamento



Para evaluar escenarios de oferta y demanda de madera, se integraron estas bases de datos en el software OpTimber-LP®, una herramienta de soporte para la toma de decisiones optimizadas, diseñada para la planificación forestal a nivel táctico y estratégico. La proyección de crecimientos se realizó mediante las funciones desarrolladas por Friedl et al. (1992), Costas et al. (2003), Fassola et al. (2007) y Keller et al. (2015). Se definieron tres prescripciones de manejo: sin raleo, con un raleo, y con dos raleos, admitiendo una variación de ± 4 años en la edad de corta, y ± 1 año para intervenciones de raleos. El horizonte de planificación fue de 30 años.

El modelo matemático desarrollado busca estabilizar la producción de madera a lo largo del horizonte de planificación, minimizando la variabilidad entre los volúmenes anuales máximos y mínimos. La función objetivo se define en la ecuación (1).

$$\text{MinDIF} = \text{Min}(\text{MinMax} - \text{MaxMin}) \quad (1)$$

Esta función minimiza la diferencia entre la producción anual máxima y mínima de madera a lo largo del horizonte de planificación, actuando como regulador de los valores extremos de volumen. Para ello, distribuye la cosecha de forma equilibrada entre los distintos periodos, reduciendo las fluctuaciones y favoreciendo el cumplimiento de los requerimientos industriales. Se acompaña de un conjunto de restricciones que aseguran que la superficie asignada a cada clase de edad no exceda el área disponible y que la suma de áreas correspondientes a distintas alternativas de manejo sea igual al área total de cada clase. Otras restricciones establecen límites a la producción anual, manteniendo los volúmenes dentro de un rango que contribuya a minimizar la diferencia entre el máximo y el mínimo. Finalmente, se incorpora una restricción que garantiza que la producción de cada tipo de producto cumpla con la demanda mínima requerida por las industrias

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo fue ejecutado bajo el supuesto de una demanda constante de 7,1 millones de m³ anuales. En los primeros ocho años, se proyecta un aprovechamiento intensivo de más de 16 millones de m³, proveniente de plantaciones envejecidas (>15 años). Esta etapa inicial permite liberar superficie para nuevas plantaciones y reequilibrar la estructura por edades (Gráfico 2).

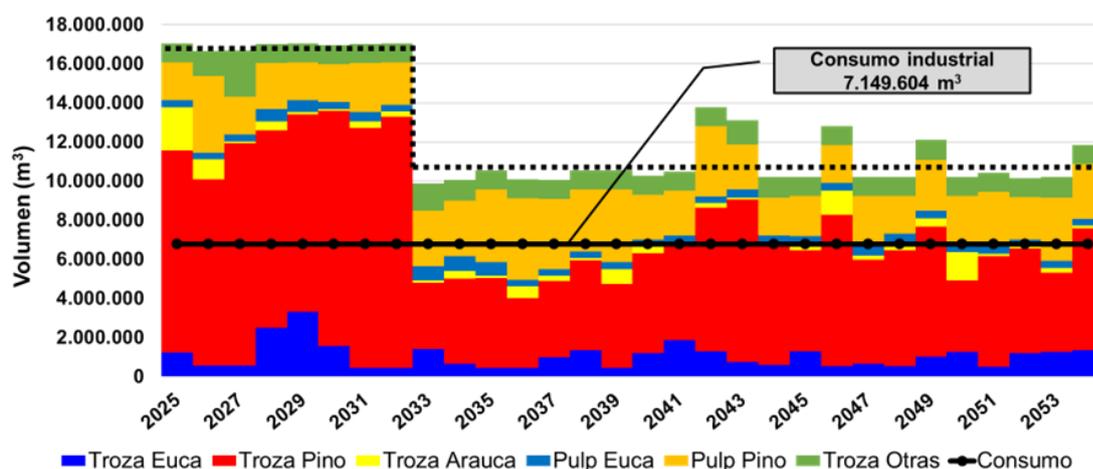


Gráfico 2. Proyección del volumen anual por producto forestal

A partir de 2033, se estabiliza la producción en torno a los 10 millones de m³ anuales (50 % más que el consumo provincial actual). Los productos resultantes dependen del régimen de manejo: los rodales sin raleo generan mayor volumen de triturables, mientras que los regímenes con raleos aportan más rollos aserrables.

En términos de intervención, la superficie de tala rasa inicial casi duplica la superficie teórica ideal, alcanzando aproximadamente 45.000 ha. Hacia 2045, se proyecta un equilibrio entre la superficie de corta y la de raleo, estimándose en 20.000 ha anuales cada una. Este patrón permite estabilizar la producción y reducir excedentes estructurales.



4. CONCLUSIONES

El modelo desarrollado demuestra que, mediante herramientas de optimización matemática, es posible estabilizar la producción forestal a escala provincial. La aplicación del modelo revela que existe un importante volumen de madera madura que requiere ser aprovechado de forma inmediata para evitar pérdidas de productividad y competitividad industrial.

La planificación estratégica territorial permite anticipar desequilibrios entre oferta y demanda, proponiendo escenarios de manejo que garanticen una producción sostenida y un uso más eficiente del recurso. Se destaca la importancia de incrementar la capacidad industrial y diversificar el uso de especies secundarias (como *Toona*, *Paulownia*, *Grevillea* y *Melia*) para absorber los volúmenes proyectados y dinamizar la cadena de valor.

Si bien el trabajo no ofrece una solución directa al problema de sobreoferta, sí establece con precisión el comportamiento de la oferta, lo que posibilita diseñar políticas públicas sectoriales orientadas a incentivar nuevas inversiones y reinversiones, mejorar la tecnología industrial e incrementar el consumo industrial. Este enfoque asume que el mercado podrá absorber la producción estimada. En caso contrario, y como último recurso, se debería considerar la reducción de la superficie forestal, una medida extrema que convendría evitar por el impacto social y ambiental positivo que el sector genera en la provincia.

Finalmente, esta herramienta ofrece una base técnica para la formulación de políticas públicas que promuevan una gestión forestal eficiente, articulando producción primaria e industria y fomentando un desarrollo territorial equilibrado y sustentable.

5. LITERATURA CITADA

- ÁLVAREZ-MIRANDA, E.; GARCIA-GONZALO, J.; ULLOA-FIERRO, F.; WEINTRAUB, A.; BARREIRO, S. 2018. A multicriteria optimization model for sustainable forest management under climate change uncertainty: An application in Portugal. *European Journal of Operational Research* 269: 79–98.
- BANHARA, J.R.; ESTRAVIZ RODRIGUEZ, L.C.; SEIXAS, F.; MOREIRA, J.M.M.Á.P.; SANTOS DA SILVA, L.M.; RIBEIRO NOBRE, S.; COGSWELL, A. 2010. Agendamento otimizado da colheita de madeira de eucaliptos sob restrições operacionais, espaciais e climáticas. *Scientia Forestalis* 38(85): 85–95.
- BELAVENUTTI MARTINS DA SILVA, P.H. 2015. Planejamento otimizado da colheita florestal por blocos e talhões integrado à rede de estradas (Tesis de maestría). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.
- BETTINGER, P.; BOSTON, K.; SIRY, J.P.; GREBNER, D.L. 2017. *Forest management and planning*. Academic Press.
- BROZ, D.; DURAND, G.; ROSSIT, D.; TOHMÉ, F.; FRUTOS, M. 2016. Strategic planning in a forest supply chain: A multigoal and multiproduct approach. *Canadian Journal of Forest Research* 47: 297–307.
- BROZ, D.; LÓPEZ, M.; SANZOVO, E.; ARCE, J.; REIS, H. 2021. Evaluation of the economic and volumetric performance of strategic planning in a forest plantation in the north of Misiones Province, Argentina. In D. A. Rossit, F. Tohmé, & G. Mejía Delgadillo (Eds.), *Production Research* 1408: 164–170. Springer, Cham.
- BROZ, D.; LÓPEZ, M.; SANZOVO, E.; ARCE, J.; REIS, H. 2022. Evaluation of different strategic planning approaches in a forest plantation in the north of Misiones Province, Arg. *Mathematical Biosciences and Engineering* 19(1): 918–935.
- BUONGIORNO, J.; GILLESS, J.K. 2003. *Decision methods for forest resource management*. Academic Press.
- CASTILLO EDUA, B.R., MENDOZA, Z.A. 2018. Modelación del raleo mediante el uso de la programación lineal en plantaciones de *Pinus caribaea* M. de la Empresa Agroforestal Pinar del Río, Cuba. *Arnaldoa* 25(2): 597–614.
- CÉSPEDES, V.V. 2018. Optimización en la planificación de servicios de cosecha forestal (Tesis de maestría). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.



- COSTAS, R.; DE OLIVEIRA, A.; TERESCZUCH, M.; WEBER, E. 2003. Funciones de forma para *Pinus taeda* L. en el Norte de Misiones. En 10º Jornadas Téc. Forestales y Ambientales. FCF Eldorado – INTA EEA Montecarlo. Eldorado, Misiones, 7 p.
- CURTIS, F. 1962. Linear programming the management of a forest property. *Journal of Forestry*, 60(9), 611–616.
- DAVID, H.C.; ARCE, J.E.; OLIVEIRA, E.B.; NETTO, S.P.; MIRANDA, R.O.V., EBLING, Á.A. 2017. Economic analysis and revenue optimization in management regimes of *Pinus taeda*. *Ceres* 64(3): 222–231.
- DEMIRCI, M.; YEŞİL, A.; BETTINGER, P. 2020. Using mixed integer goal programming in final yield harvest planning: A case study from the Mediterranean region of Turkey. *Forests* 11, 744.
- DONG, L.; LU, W.; LIU, Z. 2018. Developing alternative forest spatial management plans when carbon and timber values are considered: A real case from northeastern China. *Ecological Modelling* 385: 45–57.
- FASSOLA, H.E.; CRECHI, E.; KELLER, A.; BARTH, S. 2007. Funciones de forma de exponente variable para la estimación de diámetros a distintas alturas en *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden cultivado en la Mesopotamia Argentina. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias* 36(2): 109–128.
- FRIEDL, R.A.; COSTAS, R.A.; ORUÉ, E.; AMARILLA, A.D.C.; CINTO, J.P. 1992. Funciones de forma relativa polinómicas en *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. *Revista Yvyrareta* 3: 63–69.
- GILMORE, P.C.; GOMORY, R.E. 1961. A linear programming approach to the cutting stock problem. *Operations Research* 9(6): 848–859.
- HUANG, Y.; QIN, H.; GUAN, Y. 2019. Assessing the impacts of four alternative management strategies on forest timber and carbon values in northeast China. *Scandinavian Journal of Forest Research* 34: 289–299.
- IZQUIERDO, A.E.; GRAU, H.R.; AIDE, T.M. 2011. Implications of rural–urban migration for conservation of the Atlantic Forest and urban growth in Misiones, Argentina (1970–2030). *Ambio* 40(3): 298–309.
- KELLER, A.; CRECHI, E. 2015. Ecuaciones de volumen y forma para *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis* cultivado en la zona noroeste de Misiones, Argentina. *Actas XXIX Jornadas Forestales De Entre Ríos, Concordia*.
- LUO, L.; GAO, Y.; REGAN, C.M.; SUMMERS, D.M.; CONNOR, J.D.; O'HEHIR, J.; MENG, L.; CHOW, C.W. 2024. Emissions offset incentives, carbon storage and profit optimization for Australian timber plantations. *Forest Policy and Economics* 159: 103125.
- MARQUES, S.; BUSHENKOV, V.; LOTOV, A.; BORGES, J.G. 2021. Building Pareto frontiers for ecosystem services tradeoff analysis in forest management planning integer programs. *Forests* 12: 1244.
- NABHANI, A.; MARDANEH, E.; SJØLIE, H.K. 2024. Multi-objective optimization of forest ecosystem services under uncertainty. *Ecological Modelling* 494, 110777.
- PEREIRA, T.K. 2016. Planejamento florestal otimizado de plantios de *Eucalyptus* spp. Considerando blocos anuais de colheita. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, Brasil. 51 pp.
- PIEDRA-JIMENEZ, F.; BROZ, D.; NOVAS, J.M.; GROSSMANN, I.E.; RODRIGUEZ, M.A. 2025. Optimizing forest planning: Balancing timber production and carbon sequestration through a multi-objective disjunctive formulation. *Forest Policy and Economics* 178, 103575.
- PRETZSCH, H. 2009. *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Springer.
- QUINTERO-MÉNDEZ, M.A.; JEREZ-RICO, M. 2017. Heuristic forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10, 430.
- RÖNNQVIST, M.; D'AMOURS, S.; WEINTRAUB, A.; JOFRE, A.; GUNN, E.; HAIGHT, R.G., ROMERO, C. 2015. Operations research challenges in forestry: 33 open problems. *Annals of Operations Research* 232: 11–40.
- YOSHIMOTO, A., KONOSHIMA, M. 2016. Spatially constrained harvest scheduling for multiple harvests by exact formulation with common matrix algebra. *Journal of Forest Research* 21: 15–22.



IMPACTO DE LA DENSIDAD Y EL TURNO DE CORTA EN LA PRODUCCIÓN DE *Eucalyptus grandis* PARA USOS SÓLIDOS

María de los Ángeles GARCÍA¹; Mario FLORES²

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue comparar la producción de madera aserrable que se obtiene con diferentes densidades finales y edades de corta, en condiciones de suelos típicos del Noreste de Entre Ríos, que se tome de referencia para fijar precios de base en acuerdos de venta en pie de plantaciones de eucalipto. Para ello se tomaron datos de ensayos de raleo de *Eucalyptus grandis* en suelos arenoso, arcilloso y mestizo. Con simulador se procesaron parcelas de 12 y 16 años con densidades finales cercanas a 900, 700, 500 y 400 plantas por hectárea. Se definieron dos diámetros en punta fina aserrables mínimos, 14,1 cm y 18,1 cm, y se trozaron a 2,50 m, 3,15 m y 4,10 m. Se observó que el porcentaje de madera aserrable aumenta a medida que disminuye la densidad, en los tres sitios y en las dos opciones de trozado evaluadas. Para el turno de 13 años, los ingresos potenciales en los sitios arenoso y mestizo casi duplican los del arcilloso, comparando iguales densidades y opciones de trozado; en los turnos de 15 y 16 años, las diferencias entre los ingresos son menores, pero mantienen la tendencia. Tablas de producción estimada y de ingresos potenciales en función del manejo, sitios y turnos de corta pueden ser herramientas adicionales para la toma de decisiones por parte de pequeños productores.

Palabras clave: *manejo de eucalipto; volumen aserrable; comercialización.*

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de madera de *Eucalyptus grandis* para uso sólido ha promovido la aplicación de manejos para obtener rollos de mayor diámetro y con una mayor proporción de madera libre de nudos, donde las podas y el manejo de la densidad se han convertido en prácticas indispensables (Hawley y Smith, 1982; Methol, 2002; Larocca et al., 2004). Por otro lado, las prácticas silvícolas intensivas deben considerar el tiempo necesario para que su efecto se traduzca en las características deseadas para el rodal que se maneja. El turno de corta y la rentabilidad esperada deben analizarse en conjunto. García et al. (2023) señalan que el turno de corta puede definirse de acuerdo con el objetivo productivo, con flexibilidad para ajustarse a la demanda. Por otra parte, los aserraderos que elaboran productos de mayor valor agregado demandan rollizos de diámetros mínimos que han ido aumentando en los últimos años (García et al., 2023).

A partir de la existencia en la región de un mercado de precios diferenciales de madera rolliza según diámetro en punta fina, el manejo silvícola aplicado a las plantaciones de eucalipto ha ido experimentando cambios, con ciertas particularidades dependiendo del tipo de productor. En Entre Ríos, el 12,3 % del área forestada pertenece a pequeños productores, con menos de 100 hectáreas forestadas (Mastrandrea et al., 2024). Entre ese tipo de productores, la venta del monte en pie del volumen total o volumen aserrable (según un diámetro mínimo en punta fina) es la más habitual (Mastrandrea et al., 2014). Sin embargo, estimar la existencia en pie del volumen aserrable requiere de la medición y cubicación por técnicos especializados, lo que en el caso de pequeños productores resulta muchas veces costoso en relación con su escala y poder de negociación.

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

² Técnico Regional Entre Ríos, Región Río Uruguay, Dirección Nacional de Desarrollo Foresto Industrial, Secretaría de Agricultura, ganadería y pesca de la Nación. mhforestal@gmail.com



El objetivo de este trabajo fue comparar la producción de madera aserrable que se obtiene con diferentes densidades finales y edades de corta, en condiciones de suelos típicos de la región, que pueda tomarse de referencia para fijar precios de base en acuerdos de venta en pie de plantaciones de eucalipto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó a partir de datos de ensayos de raleo de *Eucalyptus grandis* ubicados en tres departamentos de la provincia de Entre Ríos, en sitios con marcadas diferencias de suelo: arenoso (Estación Yuquerí, Concordia, 31°22'6.27"S; 58° 6'55.12"O), mestizo (Concepción del Uruguay, 32°29'41.38"S; 58°20'43.25"O) y arcilloso (Aldea San Gregorio, Colón, 31°43'44.08"S; 58°19'23.49"O).

De cada ensayo se tomaron las mediciones de dos edades coincidentes con turnos comerciales: 13 y 15 años en los sitios arenoso y arcilloso; 13 y 16 años en el sitio mestizo. Se procesaron las parcelas de los tratamientos testigo (sin raleo) y con densidades finales de 700 plantas/ha, 500 plantas/ha y 400 plantas/ha. Las parcelas con densidades finales similares a las densidades de interés se agruparon y se procesaron en conjunto, aun proviniendo de diferentes tratamientos de raleo.

Para la estimación de los volúmenes aserrables se simuló el trozado usando la planilla EUCACUBIK 1.0 según dos diámetros en punta fina con corteza (DPFcc) requeridos por aserraderos: 1) $\geq 14,1$ cm, y 2) $\geq 18,1$ cm; cada simulación se realizó con tres largos de troza comerciales (2,50 m, 3,15 m y 4,10 m). A partir de los volúmenes obtenidos con el trozador, se calcularon los porcentajes de volumen aserrable respecto del volumen total.

Además, a los volúmenes resultantes de cada opción de trozado se les aplicó un precio diferencial; se tomaron los valores modales publicados en la planilla de precios forestales del INTA Concordia del 31/07/2025, de las categorías de monte en pie con más de 12 cm en punta fina (21.500 \$/t) para la opción de trozado 1, y más de 18 cm en punta fina (25.700 \$/t) para la opción de trozado 2. Se utilizó una densidad de 0,9 kg/m³ para convertir los volúmenes a toneladas en pie.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 1 muestra el DAP medio, el volumen total con corteza (VTcc) y los porcentajes promedio del volumen resultante de las dos opciones de trozado (% VTcc) respecto del volumen total. Se muestran los promedios, que presentan valores similares para los tres largos de troza.

Cuadro 1. Volumen total (VTcc), porcentaje promedio respecto de este (% VTcc) según dos diámetros mínimos en punta fina, y desvíos estándar.

Sitio	Edad	plantas/ha	DAP medio (cm)	VTcc (m ³ /ha)	Trozado 1	Trozado 2
					% VTcc con DPF $\geq 14,1$ cm	% VTcc con DPF $\geq 18,1$ cm
Arenoso	13	900	23,5	637,7	82,7 \pm 1,0	63,2 \pm 1,3
		700	25,5	552,4	86,7 \pm 0,8	68,8 \pm 1,0
		500	28,2	529,5	90,1 \pm 0,6	77,0 \pm 0,9
	15	900	24,1	686,2	84,2 \pm 1,0	65,9 \pm 1,3
		700	26,1	594,8	87,7 \pm 0,9	71,4 \pm 1,0
		500	29,0	581,7	91,3 \pm 0,6	79,4 \pm 1,0
Arcilloso	13	900	20,1	416,3	72,2 \pm 1,3	43,4 \pm 1,6
		700	22,8	430,2	79,8 \pm 1,1	57,9 \pm 1,7
		500	26,1	398,7	86,1 \pm 1,0	68,5 \pm 1,2
	15	900	21,1	502,5	77,3 \pm 1,1	53,6 \pm 1,3
		700	24,1	525,1	83,8 \pm 1,0	65,6 \pm 1,3
		500	27,6	490,1	89,1 \pm 1,1	74,8 \pm 1,2
Mestizo	13	700	26,5	683,0	88,6 \pm 0,8	75,9 \pm 1,0
		400	31,7	561,9	92,9 \pm 0,5	83,9 \pm 0,7
	16	700	28,6	848,8	91,3 \pm 0,4	81,7 \pm 0,8
		400	34,4	726,0	94,5 \pm 0,5	88,4 \pm 0,6



Si bien se observan diferencias entre sitios, existe una tendencia clara a aumentar el porcentaje del volumen con destino aserrable a medida que se extiende el turno y se reduce la densidad de plantas. Dentro de sitio y densidad, hay un incremento mayor en volumen (total y aserrable) en los sitios arcilloso y arenoso, y de menor magnitud en el mestizo. Independientemente de estos cambios, solo en el sitio arcilloso aumenta el volumen de madera aserrable al disminuir la densidad.

En coincidencia, estudios anteriores en plantaciones de eucalipto de la región reportan las mismas tendencias. García et al. (2023) presentan resultados donde el volumen con DPF >16 cm aumenta en promedio 5 % y 3 % de los 12 a los 16 años, para densidades de 700 plantas/ha y 500 plantas/ha, respectivamente; resultados similares encontraron Mastrandrea et al. (2016) en un ensayo en Nueva Escocia (Entre Ríos), donde el volumen de rollos con DPFcc >26 cm aumenta en promedio 13,6 % y 14,5 % de los 12 a los 16 años, para densidades de 700 plantas/ha y 500 plantas/ha, respectivamente.

Los ingresos potenciales que resultaron de la valorización del volumen aserrable de cada opción de trozado se muestran en el Cuadro 2. Se observan diferencias entre las distintas densidades y sitios: para un turno de 13 años los ingresos potenciales en el arenoso y mestizo son entre 1,4 y 2,2 veces mayor que los del arcilloso, comparando iguales densidades y opciones de trozado; en el turno de 15 y 16 años las diferencias entre los ingresos son menores, pero mantienen la tendencia.

Cuadro 2. Ingresos totales según diferentes precios en función del diámetro mínimo en punta fina (opciones de trozado 1 y 2). Cambio al 31/07/25 U\$D 1= 1380 AR\$.

Sitio	Edad	plantas/ha	VTcc (m ³ /ha)	Trozado 1	Trozado 2
				DPF ≥14 cm Ingresos (\$/ha)	DPF ≥18 cm Ingresos (\$/ha)
Arenoso	13	900	637,7	10.205.835	9.328.329
		700	552,4	9.265.425	8.788.629
		500	529,5	9.229.305	9.434.727
	15	900	686,2	11.183.010	10.463.241
		700	594,8	10.094.250	9.826.395
		500	581,7	10.270.980	10.682.205
Arcilloso	13	900	416,3	5.812.095	4.180.362
		700	430,2	6.645.435	5.760.141
		500	398,7	6.639.630	6.314.490
	15	900	502,5	7.519.410	6.233.535
		700	525,1	8.521.095	7.968.285
		500	490,1	8.448.210	8.477.145
Mestizo	13	700	683,0	11.715.780	11.989.050
		400	561,9	10.094.250	10.911.963
	16	700	848,8	14.999.475	16.029.090
		400	726,0	13.275.390	14.834.811

Según Mastrandrea et al. (2016), plantaciones de eucalipto manejadas a densidades de 500 a 700 plantas por hectárea en turnos de 12 y 16 años muestran indicadores de rentabilidad menos atractivos respecto de manejos a densidades menores. En otro trabajo, García et al. (2023) presentan, entre otros indicadores financieros, la variación del valor anual equivalente (útil para comparar proyectos de distinta duración), donde suelos arenoso y arcilloso muestran mejores resultados a medida que disminuye la densidad final, mientras que, en suelo mestizo, por el contrario, el valor anual equivalente disminuye a medida que la densidad es menor; las tendencias se mantienen en los turnos de 12 y 16 años.

4. CONCLUSIONES

Construir una tabla de ingresos potenciales en función de esquemas de manejo, sitios y turnos de corta alternativos puede ser una herramienta adicional para la toma de decisiones por parte del productor. Sin embargo, dado que se trata de una actividad con ingresos a largo plazo, dichas decisiones deben estar fundadas en aspectos biológico-productivos y de tendencias de mediano plazo en relación con lo que el mercado demanda y reconoce con mayores precios.



En lo que respecta a los manejos y turnos evaluados bajo el esquema de precios actual, considerando solo las fracciones que tendrían destino de uso sólido, podría decirse que en caso de que existiera una exigencia por parte de las industrias de aserrado de diámetros mínimos mayores, debería incrementarse el diferencial de precios para estimular al productor a realizar manejos que produzcan mayor proporción de este tipo de rollos (asociados a una menor densidad final y a turnos más largos), sobre todo si se trata de sitios arenosos o arcillosos.

5. LITERATURA CITADA

EUCACUBIK 1.0. <https://www.argentina.gob.ar/inta/eucacubik-10>

GARCÍA, M. de los A.; FLORES, M.; MASTRANDREA, C.A. 2023. Raleo de plantaciones de eucalipto. Día de Campo y Taller. Estación Experimental Agropecuaria Concordia, INTA, noviembre de 2023.

HAWLEY, R.C.; SMITH, D.M. 1982. Silvicultura Práctica. Ed. Omega S.A., Barcelona.

INTA EEA Concordia. 2025. Planilla de precios forestales - NE de Entre Ríos (31 de julio de 2025). https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2025/08/2025-07-31_planilla_de_precios_forestales.pdf

LAROCCA, F.; DALLA TEA, F.; APARICIO, J. 2004. Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos forestadores en Entre Ríos y Corrientes. En: XIX Jornadas forestales de Entre Ríos. (2004, Concordia, AR). Actas XIX Jornadas forestales de Entre Ríos, octubre de 2004.

MASTRANDREA, C.A.; FLORES PALENZONA, M.H.; ROMAN, L. 2024. El trabajo en la actividad forestal del nordeste de la provincia de Entre Ríos. ImpaCT.AR Desafío 58 Cuantificación y caracterización de los mercados de trabajo de actividades de base agraria para la gestión de políticas públicas N° 2. <https://www.ceil-conicet.gov.ar/wp-content/uploads/2024/01/im02-Forestal-Mastandrea-Flores-Roman.pdf>

MASTRANDREA, C.A.; FLORES PALENZONA, M.H.; GARCÍA, M. de los A. 2016. Rentabilidad de una plantación de *Eucalyptus grandis* bajo diferentes esquemas de intensidad y oportunidad de raleo a los 10, 12 y 16 años de edad, en el noreste de Entre Ríos.

MASTRANDREA, C.A.; FLORES PALENZONA, M.H.; GARCÍA, M. de los A. 2014. Rentabilidad de diferentes manejos de *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) en Entre Ríos (Argentina) según esquemas de comercialización de trozas. Revista Forestal Mesoamericana Kurú 11 (27): 47-54 (2014). https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/17461/INTA_CREntreRios_EEAConcordia_Mastandrea_CA_Rentabilidad_de_diferentes_manejos_de_eucalipto.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

METHOL, R. 2002. Evaluación de distintos esquemas de raleo para *Eucalyptus grandis*. En: Jornada Forestal: Visita a ensayos de silvicultura y mejoramiento de pinos y eucaliptos. Programa Nacional Forestal de INIA. Recuperado de: <http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/tb/ad/2002/ad303.pdf>.



NIVEL SONORO EN MÁQUINAS DE COSECHA FORESTAL EN SISTEMA FULL TREE

Tatiana CINQUETTI¹; Daniel A. FERRO¹; Luciano LARRIEU¹; Matilde MUR¹; Victor H. MERANI¹; Richardson BARBOSA GOMES DA SILVA²; Danilo SIMÕES²

RESUMEN

La cosecha forestal es una actividad en donde intervienen diferentes factores que afectan el desempeño operacional. La OIT menciona que este sector es uno de los más riesgosos en términos de daños crónicos y enfermedades profesionales, conjunto con la construcción y minería. El objetivo de este trabajo fue medir los niveles de ruido en dos *feller buncher*, uno de orugas y otro de neumáticos marca John Deere®. El *feller* de orugas con aproximadamente 6000 horas de uso y el de neumáticos con 820 horas de uso, con cabezales marca John Deere®, fueron utilizados en el mismo rodal de *Eucalyptus sp.* de 6 años ubicados en Itatinga, Botucatu, SP, Brasil. Los valores de ruido medidos se proyectaron a 8 h utilizando un nivel base de 85 dB (Lavg); se calculó la dosis de exposición diaria (D) y el máximo tiempo de exposición diaria (MEDP) en base a 85 dB y una tasa de cambio de 5 dB. Se utilizó el dosímetro marca Instrutherm® modelo DOS-1000X, con certificado de calibración vigente y el procedimiento de recolección de datos se realizó en base a la norma ISO 9612:2009. Los resultados mostraron valores de Lavg de 56,6 dB para orugas y 61,7 dB para neumático, D de 50 % y 70 % y MEDP de 17 d 2 h y 8 d 2 h, orugas y neumático, respectivamente. Estos valores indicarían que la exposición diaria al ruido se encuentra por debajo de lo considerado perjudicial por la OIT:

Palabras clave: *feller buncher*, ergonomía, dosímetro, dB

1. INTRODUCCIÓN

La cosecha forestal es una actividad donde intervienen diferentes factores que afectan el desempeño operacional. La tecnología ha ayudado a transformar la maquinaria agrícola lo que ha permitido tener una mejor productividad y eficiencia en cada una de las actividades del sector. En el último tiempo la mecanización de las actividades rurales, y específicamente de la cosecha forestal, ha aumentado significativamente a nivel mundial, intensificándose a partir de la década del 60 (FAO, 2022). Uno de los principales motivos de este avance, fue la necesidad de aumentar la productividad, disminuir los costos y mecanizar actividades de alto riesgo para la salud de los trabajadores, disminuyendo de este modo accidentes y enfermedades profesionales, brindando una mejor condición laboral para los operarios (OIT, 2014).

A medida que las máquinas se fueron haciendo más complejas, su operación se ha vuelto más sofisticada requiriendo por parte de los operarios un nivel de capacitación mayor para las diversas labores y tipos de maquinaria.

Según Silversides (1997), la mecanización de la cosecha forestal se puede dividir en 6 etapas principales según los implementos utilizados: herramientas manuales y animales de tiro; varias combinaciones de herramientas manuales; herramientas motorizadas y manuales; máquinas operadas manualmente; máquinas que realizaban automáticamente algunas actividades repetitivas y máquinas que utilizan la retroalimentación de las actividades para controlar y ajustar punto a punto los elementos de trabajo.

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales- Universidad Nacional de La Plata

² Faculdade de Ciências Agrônomicas - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho



Los trabajadores forestales, y en particular, aquellos que se dedican al manejo de maquinaria, se encuentran con desafíos constantes de prevención y control de riesgos en los lugares de trabajo, ya que trabajan en entornos estresantes (Diwe et al, 2016). Durante la jornada laboral, se exponen a diversos peligros propios de la actividad que realizan, entre ellos se pueden mencionar accidentes como caída de árboles o ramas sobre el tractor, vuelco de la maquinaria e incluso ruptura de cadenas o discos de corte.

Estudios recientes han demostrado que una exposición prolongada al ruido disminuye el tiempo de reacción del personal, merma la concentración, genera interferencias en la comunicación, trae problemas de memoria y deteriora el bienestar general (Bolaji, 2018). En este contexto, el objetivo de este trabajo consistió en cuantificar los niveles de ruido en dos tipos de *feller buncher* distintos, uno de rudas y otro de orugas y relacionarlo con posibles daños en la salud de los operarios

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del estudio

Los datos fueron recolectados en abril del 2025 durante la cosecha mecanizada de *Eucalyptus sp.* en un establecimiento forestal ubicado en la localidad de Itatinga, Botucatu- SP, con rodales sobre terrenos que no superan los 5° de pendiente.

Las condiciones meteorológicas en este estudio (Cuadro 1) fueron medidas con una estación meteorológica digital portátil (Instrutherm Termo-Higro-Anemómetro Luxímetro Modelo Thal-300).

Cuadro 1. Condiciones meteorológicas para cada *Feller buncher*.

<i>Feller buncher</i>	Orugas Neumáticos	
Temp. (°C)	23	32,1
HR (%)	64,1	47,5
Vel. Viento (km/h)	2	0
Ráfagas viento (km/h)	6,9	1,5

Características de la máquina y del operador

El nivel de exposición sonora fue realizado en dos operarios de *feller* en el mismo rodal (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características de los operarios y maquinaria

Variables	Op. 1	Op.2	
Características del operador	Edad (años)	27	48
	Peso (kg)	85	95
	Altura (m)	1,78	1,80
	Experiencia (años)	5	15
Máquina	Marca	John Deere	John Deere
	Modelo	903M	463L
	Cabina (presencia)	si	si
	Horas de uso (h)	6015	820
	Sistema rodante	orugas	neumáticos
Cabezal	Marca	John Deere	John Deere
	Modelo	FS50	FD55
	Tipo	Disco	Disco

Nivel de exposición sonora o nivel de presión sonora percibido por los operadores

Para la determinación del nivel de exposición sonora, se utilizó un dosímetro de ruido marca Instrutherm modelo DOS-1000X, con certificado de calibración vigente y el procedimiento de recolección de información se realizó bajo la norma ISO 9612:2009. Se recopilaron datos durante 2 horas y 7 minutos en el caso del *feller* de orugas y 1 hora 19 minutos para el *feller* de neumáticos en condiciones normales de trabajo (Cuadro 3).



Para los procedimientos de recopilación del nivel de presión sonora (SPL) se siguieron las directrices de la norma ISO 9612:2009 de la Organización Internacional de Normalización (ISO) "Acústica: Determinación de la exposición al ruido ocupacional" (ISO, 2009). Las respuestas de SPL obtenidas se expresaron en decibelios (dB) y fueron medidas cada 60 s.

Se verificaron los niveles promedio de exposición diaria al ruido ocupacional (Lavg), la dosis (%) y el nivel de ruido promedio (TWA) para proyectar la dosis a 8 horas de trabajo, correspondientes a la jornada laboral normal medidos por el dosímetro, según lo establecido en la Organización Internacional del Trabajo (OIT, 2023), que aborda las actividades y operaciones insalubres. Para la jornada laboral de ocho horas, se adoptó el criterio de 85 dB de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018), que establece los límites de tolerancia para el ruido continuo.

Luego se calculó la exposición diaria máxima permitida (MEDP, h), para lo mismo se utilizó la ecuación (1), para la exposición al ruido ocupacional presentada en el trabajo de Camargo et al. (2021) considerando el factor de incremento de dosis de 5. Este parámetro es fundamental para controlar el tiempo de exposición diario de los trabajadores al ruido ocupacional.

$$MEDP (h) = \frac{480}{2^{(L_{avg}-85)/5}} \text{ (Ecuación 1)}$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 3 se pueden observar los resultados obtenidos en cada caso.

Cuadro 3. Resultados obtenidos para cada medición realizada en los dos tipos de *feller*

<i>Feller buncher</i>	Orugas	Neumáticos
<i>T (h:min)</i>	2:07	1:19
<i>Lavg (dB)</i>	56,6	61,7
<i>Dosis (%)</i>	50	70
<i>TWA (dB)</i>	47	48,7
<i>MEDP (h)</i>	410	202

El análisis comparativo del nivel de exposición al ruido ocupacional entre los *feller* de orugas y de neumáticos evidenció diferencias mínimas entre ambos equipos. Para el caso de los *feller buncher* de orugas el valor de Lavg fue de 56,6 dB, permitiendo una MEDP de 17d y 2 h. Por su parte, en el *feller* de neumáticos se registró un Lavg de 61,7 dB lo que permitiría una MEDP de 8d 10, indicando que ninguno de los operadores estuvo expuesto a niveles de ruido ocupacional superiores al límite de exposición, lo que resultó en períodos de MEDP superiores a los estipulados para el cumplimiento durante la jornada laboral diaria.

4. CONCLUSIONES

En todos los casos, los niveles registrados se mantuvieron por debajo del límite considerado como perjudicial para la salud según la OIT, lo que presenta un resultado favorable desde el punto de vista ergonómico.

Estos resultados podrían sugerir que, si bien el tipo de tren de rodaje puede influir levemente en la emisión sonora, ambos diseños se encuentran dentro de rangos aceptables de exposición, permitiendo desarrollar las tareas sin comprometer la seguridad del operario.

5. LITERATURA CITADA

- BOLAJI, B.O.; OLANIPEKUN, M.U.; ADEKUNLE, A.A.; ADELEKE, A.E. (2018). An analysis of noise and its environmental burden on the example of Nigerian manufacturing companies. *J. Clean. Prod.*, 172, 1800–1806
- CAMARGO, D. A., MUNIS, R. A., & SIMÕES, D. (2021). Investigation of exposure to occupational noise among forestry machine operators: A case study in Brazil. *Forests*, 12(3), 299.



- DIWE, K. C., C. B. DURU, A. C. IWU, I. A. MERENU, K. A. UWAKWE, U. R. OLUOHA, T. B. OGUNNIYAN, U. C. MADUBUEZE AND I. OHALE. (2016) Occupational hazards, safety and hygienic practices among timber workers in as south eastern State, Nigeria. *Occupational Diseases and Environmental Medicine* 4(3):63-71.
- FAO. 2022. The State of Food and Agriculture 2022. Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome, FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9479en>
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9612:2009. (2009) In *Acoustics—Determination of Occupational Noise Exposure— Engineering Method*; BSI Standards Limited: Geneva, Switzerland.
- ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO (OIT). (2023). Ruido. Obtenido de: <https://www.ilo.org/es/temas/administracion-e-inspeccion-del-trabajo/biblioteca-de-recursos/la-seguridad-y-salud-en-el-trabajo-guia-para-inspectores-del-trabajo-y-ruido>
- ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO (OIT). (2014). Cómo mejorar las condiciones de trabajo y la productividad en empresas agrícolas y agroindustriales. https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@americas/@ro-lima/@ilo-buenos_aires/documents/publication/wcms_bai_pub_14.pdf
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. (2018). Guía sobre el ruido en la salud. Ginebra: OMS. Organización Mundial de la Salud.
- SUNDBERG, U. 1978. TEKNIK I SKOG. I: SKOGSHÖGSKOLAN 150 år. Problem och idéer i svenskt skogsbruk 1828-1978. Liber förlag. Stockholm Sweden. ISBN 91-7088-979-1. (In Swedish)
- SILVERSIDES, C.R. 1997. Broadaxe to flying shear. The mechanization of forest harvesting east of the Rockies. National museum of science and technology. Transformation series 6. Ottawa, Canada. 174 pp



ANÁLISIS EXPLORATORIO DEL POTENCIAL DENDROENERGÉTICO DE *Eucalyptus sideroxylon* EN DOS EDADES CONTRASTANTES

Jose BAROTTO^{1,2}; Pablo PATHAUER³; Dino PALAZZINI^{1,3}; Natalia RAFFAELI^{1,2}

RESUMEN

Eucalyptus sideroxylon es una especie de interés por su tolerancia a heladas, sequías y suelos pobres, además de su madera densa y durable. El objetivo de este estudio fue caracterizar y comparar las propiedades dendroenergéticas de la madera y el carbón de *E. sideroxylon* en individuos de 6 y 22 años. Se analizaron densidad básica, cenizas, rendimiento de carbonización, poder calorífico e índice de valor del combustible (IVC) en madera, y densidad aparente, cenizas, volátiles, carbono fijo, poder calorífico e IVC en carbón. Los resultados mostraron incrementos significativos con la edad en densidad de la madera (+34 %) y rendimiento de carbonización (+26 %), junto con una reducción (-31 %) en cenizas. El IVC de la madera casi duplicó su valor (+96 %). En carbón, se observó mayor densidad y carbono fijo, con una disminución en cenizas (-65 %) y un aumento del IVC (+255 %). Se concluye que *E. sideroxylon* es una especie promisoriosa para bioenergía, ofreciendo leña y carbón vegetal de elevada calidad energética, con mejoras asociadas al avance de la edad.

Palabras clave: *dendroenergía, combustible renovable, evolución, carbón vegetal*

1. INTRODUCCIÓN

Los recursos forestales gestionados de manera sostenible constituyen una fuente estratégica de riqueza para países como Argentina, al generar empleo, ingresos y mejoras en la calidad de vida de las comunidades locales. En este marco, los bosques cultivados proveen materia prima renovable para múltiples industrias y energía a partir de biomasa, contribuyendo a disminuir la presión sobre los bosques nativos (Barotto et al., 2024). El género *Eucalyptus* L'Hér se destaca como uno de los principales a nivel mundial y en Argentina ocupa el segundo lugar en importancia detrás del pino, con más de 350.000 ha implantadas, concentradas mayoritariamente en las provincias mesopotámicas y en Buenos Aires, que reúnen alrededor del 90 % de la superficie nacional cultivada con este género (Gorzycki, 2023).

Varias son las especies de *Eucalyptus* que se cultivan en la región pampeana, siendo las más preponderantes *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus dunnii*, de rápido crecimiento, catalogadas como poco durables (Ferrere et al., 2023). Respecto a este punto, *Eucalyptus sideroxylon* es una especie que se destaca por su resistencia a estreses abióticos, principalmente heladas, sequías y suelos pobres, y cuya madera, dura y densa, presenta durabilidad natural (Taraborelli et al., 2024; Pathauer y Palazzini, 2021). Si bien el desarrollo de esta especie es relativamente incipiente en nuestro país, Pathauer y Palazzini (2021) reportan crecimientos comparables con el de otras especies de *Eucalyptus* para la región pampeana a los 4 años, por lo que puede considerarse una especie promisoriosa. Se ha empleado en la restauración de canteras y suelos degradados (Boland et al., 1992). Su madera se utiliza en la fabricación de durmientes, postes, estructuras rurales y marítimas, leña y muebles artesanales. En cuanto a productos no madereros, ofrece aceites esenciales como eucaliptol y cineol, usados en las industrias farmacéutica y cosmética; su corteza es rica en taninos, y su floración extensa la vuelve valiosa para la apicultura (Ansari, 2017).

¹ Laboratorio de Investigaciones en Madera (LIMAD), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata. Contacto: jose.barotto@agro.unlp.edu.ar

² Cátedra de Industrias de Transformación Química, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

³ Instituto de Recursos Biológicos - Centro de Investigaciones en Recursos Naturales - INTA



La leña y el carbón vegetal de *Eucalyptus sideroxylon* representan una alternativa para la generación de energía renovable, contribuyendo a diversificar la matriz energética y a reducir emisiones de gases de efecto invernadero (FAO, 2020). Estos biocombustibles son utilizados por grandes consumidores industriales, así como por usuarios comerciales y residenciales, siendo en países en desarrollo la cocción y calefacción los principales destinos. En Argentina, la producción de leña y carbón proviene mayoritariamente de bosques nativos del norte; sin embargo, la madera de *E. sideroxylon* no destinada a aserrado o a productos de mayor valor agregado podría emplearse en su elaboración mediante pirólisis, proceso termoquímico que mejora la calidad energética, en particular el poder calorífico. El rendimiento de carbonización depende tanto de las propiedades químicas, físicas, mecánicas y anatómicas de la madera como de las condiciones del proceso (temperatura, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia) y la calidad de los productos resultantes se evalúa a través de parámetros como humedad, volátiles, cenizas y poder calorífico, que permiten determinar su idoneidad como biocombustibles.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar y comparar las variables dendroenergéticas de la madera y el carbón de *Eucalyptus sideroxylon* para dos individuos, de 6 y 22 años respectivamente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal y muestreo

Se seleccionó un individuo de 6 años proveniente de un ensayo de progenies instalado en el predio del CNIA-INTA (Hurlingham, Buenos Aires), con diámetro de 14,5 cm a 1,3 m de altura (DAP) y un individuo de 22 años, de 31,6 cm de DAP, dentro del mismo predio, procedente de un rodal con características fenotípicas superiores para la especie, incluido en la selección de individuos que integran la red de ensayos genéticos de INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Los mismos fueron apeados y se colectaron toretes de 1 m de longitud que contenían como punto central la altura al DAP, los cuales fueron reaserrados para obtener cubos de aproximadamente 2 cm de lado. Este procesamiento fue llevado a cabo en el aserradero del Centro Tecnológico de la Madera (CTM) perteneciente a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (FCAyF-UNLP).

Determinaciones realizadas

La totalidad de los ensayos descritos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigaciones en Madera (LIMAD, FCAyF, UNLP), con excepción de la determinación de poder calorífico (realizada en el Laboratorio de Calidad de Alimentos, Suelos y Agua de INTA Pergamino). Para madera, se trabajó con cubos de aproximadamente 2 cm de lado, mientras que las determinaciones en carbón se realizaron sobre carbón molido, con excepción de la determinación de densidad relativa aparente, llevada a cabo sobre carbón en cubos. A fines comparativos, los valores se reportan en base seca (descontando el contenido de humedad).

- En madera:

Densidad básica (kg/m³): 7 cubos por material (n = 7) sumergidos en agua durante 3 días hasta completa saturación y determinación del volumen por inmersión. Peso seco en estufa, a 105 °C, hasta peso constante. *Densidad básica* = peso seco / volumen verde

Proporción de cenizas (%): n = 4 (por material), en mufla eléctrica, según protocolo de trabajo (Barotto et al., 2024). *Proporción de cenizas* = peso cenizas / peso madera * 100

Rendimiento de carbonización (%): n = 17 y 10 (6 y 22 años, respectivamente). Proceso de pirólisis en mufla eléctrica, bajo condiciones controladas y protocolo propio (Barotto et al., 2024), derivado de la norma ASTM D1762. *Rendimiento de carbonización* = peso carbón / peso madera * 100

Poder calorífico superior de la madera (MJ/kg): n = 2 (por material), mediante bomba calorimétrica siguiendo la norma europea FPR EN 14918 ("Solid biofuels - Determination of calorific value").

- En carbón:

Densidad aparente relativa (kg/m³): n = 3 (por material), calculada mediante la norma brasileña NBR 9165/85. *Densidad aparente relativa* = peso seco / volumen húmedo



Proporción de cenizas (%): $n = 3$ (por material), en mufla eléctrica, bajo el mismo protocolo que en el caso de madera. *Proporción de cenizas* = peso cenizas / peso carbón * 100

Proporción de volátiles (%): $n = 12$ y 6 (6 y 22 años, respectivamente) en mufla eléctrica y siguiendo un protocolo propio (Barotto et al., 2024). *Proporción de volátiles* = (peso con volátiles - peso sin volátiles) / peso con volátiles * 100

Poder calorífico superior del carbón (MJ/kg). Mismo n y norma que para madera.

- Variables derivadas

Carbono fijo (CF, %). Solo en carbón. *Carbono fijo* = $100 - (\text{Humedad} + \text{volátiles} + \text{cenizas})$

Índice de Valor del Combustible (IVC; MJ/m³). En madera y carbón, de la siguiente manera: $IVC = \text{Densidad} * \text{Poder Calorífico} / \text{Prop. cenizas}$

Análisis estadístico:

Para cada una de las variables evaluadas, con excepción del poder calorífico y las variables derivadas (CF e IVC), se analizó la existencia de diferencias significativas entre las edades evaluadas. El análisis se llevó a cabo mediante análisis de la varianza, utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2020). Para el caso de las variables derivadas, se analizó la tendencia. Se analizó además la variación porcentual de todas las variables analizadas en función de la edad, y para aquellas variables estudiadas tanto en madera como en carbón (densidad, cenizas, poder calorífico e índice de valor combustible), se analizó la variación entre ambos materiales, para cada edad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respecto a las variables dendroenergéticas analizadas en la madera (Cuadro 1), se encontraron diferencias significativas en dos variables de gran importancia: densidad básica de la madera, con una ganancia superior al 33 %, y rendimiento de carbonización, muy cercana al 26 %. El contenido de cenizas, si bien no mostró diferencias significativas, presentó una tendencia a disminuir a medida que aumenta la edad. Llamativamente, la variación en poder calorífico entre las dos edades fue menor al 1%. Estos cambios en las características de la madera con la edad, con la excepción de esta última variable, son beneficiosos desde el punto de vista energético y dieron como resultado un aumento del 96% en el índice de valor del combustible, el cual permite valorar y comparar la idoneidad de diferentes materiales para su uso energético (Purohit y Nautiyal, 1987).

Cuadro 1. Valores medios de las variables analizadas en la madera de *Eucalyptus sideroxylon* para dos edades y variación porcentual (respecto al valor inicial). Valores en negrita indican diferencias significativas entre edades.

Variable	6 años	22 años	Variación
Densidad básica (kg/m ³)	613,9	821,4	33,80 %
Proporción de cenizas (%)	0,45	0,31	-31,11 %
Rendimiento de carbonización (%)	25,80	32,50	25,97 %
Poder calorífico (MJ/kg)	19,50	19,69	0,94 %
Índice de Valor Combustible (MJ/m ³)	26.605	52.161	96,06 %

En cuanto al carbón de esta especie (Cuadro 2), presentó diferencias significativas entre ambas edades para densidad relativa aparente y proporción de cenizas, siendo esta última característica la que presentó mayor variabilidad con la edad, disminuyendo alrededor de un 65 %. Tanto la proporción de volátiles como el carbono fijo no presentaron diferencias significativas entre edades, si bien se observa una tendencia hacia una disminución del primero y un consiguiente aumento del segundo. Estas son tendencias beneficiosas en pos de una mejor calidad de este carbón para su uso como biocombustible. Por otro lado, y al igual que para el caso de la madera, no se encontraron diferencias en poder calorífico entre los carbones obtenidos a partir de la madera de su respectiva edad, con apenas un 0,35 % de



variación, mientras que el índice de valor del combustible presentó un aumento con la edad, registrando una variación en torno al 255 %.

Cuadro 2. Valores medios de las variables analizadas en el carbón de *Eucalyptus sideroxylon* para dos edades y variación porcentual (respecto al valor inicial). Valores en negrita indican diferencias significativas entre edades.

Variable	6 años	22 años	Variación
Densidad relativa aparente (kg/m ³)	520,0	636,7	22,44 %
Proporción de cenizas (%)	1,33	0,46	-65,41 %
Proporción de volátiles (%)	30,04	26,69	-11,15 %
Carbono fijo (%)	68,63	72,85	6,15 %
Poder calorífico (MJ/kg)	30,14	30,25	0,35 %
Índice de Valor Combustible (MJ/m ³)	11.785	41.865	255,25 %

Respecto de la variación de las propiedades entre la madera y el carbón para cada edad (Figura 1), se observaron tendencias similares. Por un lado, existe una disminución de la densidad, de un grado mayor para el material de 22 años. En cuanto a la proporción de cenizas, esta aumentó de manera disímil entre materiales, con mayor énfasis en el material de 6 años, que, si bien reporta incrementos relativos del orden del 195 %, los valores absolutos de contenido de cenizas totales son marcadamente bajos, inferiores al 1,4 % en todos los casos. Estas variaciones afectan negativamente la calidad del combustible y ambas son efectos esperables. En cuanto a la densidad, esta baja debido a la pérdida de material (sobre todo volátil) durante el proceso de carbonización, mientras que, para el caso de las cenizas, al ser un material recalcitrante, no se ve significativamente alterada durante el proceso de carbonización (Barotto et al., 2024).

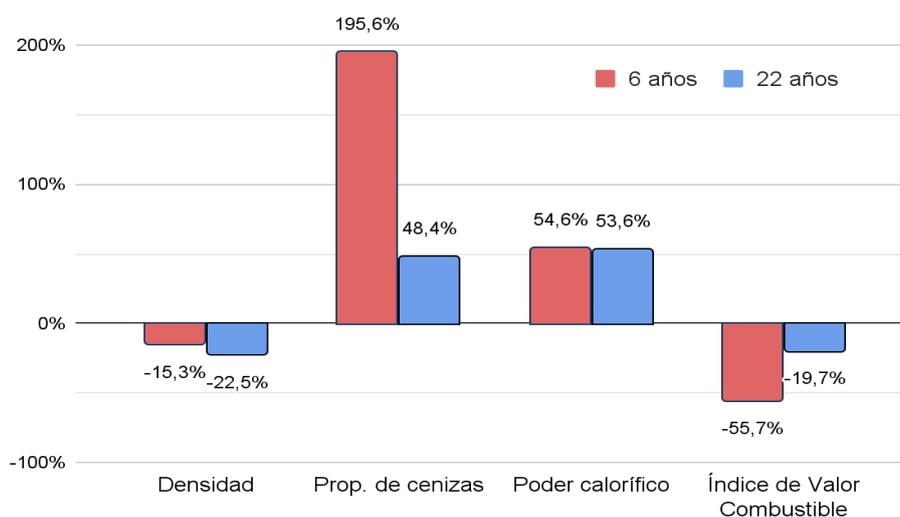


Figura 1. Variación porcentual de las características analizadas en la madera y el carbón (en base a los valores en madera) de *E. sideroxylon*, para las dos edades analizadas. Valores positivos indican un aumento en el carbón respecto a la madera y viceversa

Por otro lado, el poder calorífico aumenta de manera similar para ambas edades, apenas por encima del 50 %, acorde con lo habitualmente reportado (Keita, 1987; Ruiz-Aquino et al., 2019). Este aumento se debe a que, al carbonizar, se produce una concentración en carbono del material (alto contenido de energía), que a su vez pierde peso por la eliminación total o parcial del resto de componentes, lo cual aumenta el contenido de energía por unidad de masa. A pesar de este aumento, el índice de valor del combustible presenta una disminución en el carbón frente a la leña. Si bien esta comparación es escasamente reportada dentro de la misma especie o edad, es coincidente con lo encontrado por Ruiz-Aquino et al. (2019). Esta disminución estaría determinada por la disminución de dos de las tres



variables que lo determinan (densidad y contenido de cenizas). Respecto a este punto, la disminución del IVC para el material de 22 años indicaría que esta pérdida relativa tiende a disminuir con la edad. Finalmente, vale recordar que, si bien el IVC involucra en su cálculo variables que objetivamente influyen en la calidad del combustible, en la elección final por parte de los consumidores suelen considerarse otros factores (Estigarribia et al., 2023).

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con estos resultados preliminares basados en el análisis de un individuo por cada edad estudiada, la madera de *Eucalyptus sideroxylon* resulta un material promisorio para su utilización como biocombustible, y a su vez, para elaborar carbones de alto valor energético, de acuerdo con las variables dendroenergéticas principales observadas (buen rendimiento de carbonización, bajo contenido de cenizas y volátiles, adecuado nivel de carbono fijado y elevado poder calorífico). Previsiblemente, los valores denotan una evolución positiva de las principales variables con la edad (6 versus 22 años). En el caso de la madera, el IVC casi duplica su valor en dichas edades contrastantes, aunque de acuerdo con la literatura, este incremento podría alcanzarse en edades previas intermedias, cuestión que deberá ser estudiada en el futuro para confirmar o rebatir esta hipótesis. En el caso de los carbones, el IVC registra un aumento significativo con el avance de la edad, en línea especialmente con el menor contenido de ceniza y mayor densidad del material. Los valores reportados se encuentran en línea con aquellos estudiados para otras especies del género *Eucalyptus*, posicionando a estos materiales como opciones interesantes para utilizarlos con destino energético, estimulando la continuidad del estudio, que se orientará a aumentar la base muestral e incluir otras edades de referencia.

5. REFERENCIAS

- ANSARI, K.A. 2017. Ethnomedical uses of *Eucalyptus*: A review. *J Med Plants Stud* 5(1):298-301.
- BAROTTO, A.J.; GAUNA, J.M.; TONELLO, M.L.; HARRAND, L.; MASTRANDREA, A.C.; MARTÍNEZ, M.; OBERSCHHELP, G.P.J.; RAFFAELI, N. 2024. Caracterización dendroenergética de la madera y el carbón de diferentes materiales genéticos del género *Eucalyptus*. *Revista de la Facultad de Agronomía (La Plata)*, 122(1): 129. DOI: 10.24215/16699513e129
- BOLAND, D.; BROOKER, M.; CHEPPENDALE, G.; HALL, N.; HYLAND, B.; JOHNSTON, R.; KLEINIG, D.; TURNER, J. 1992. *Forest trees of Australia*. CSIRO publications, Melbourne, Australia.
- ESTIGARRIBIA, L.; CÁCERES, D.M.; PASTOR, N.; DÍAZ, S. 2023. What makes a good fire? Local actor- and science-based knowledge of fuel-related functional traits of Chaco plants. *Ecología Austral* 33: 395-410.
- DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- FAO. 2020. Introducción a la dendroenergía. Colección Documentos Técnicos N° 21. Buenos Aires. DOI: 10.4060/cb0619es
- FERRERE, P.; PALAZZINI, D.A.; LUPI, A.M.; PATHAUER, P. 2023. Herramientas para la estimación del crecimiento y la producción de plantaciones de *Eucalyptus dunnii* (Maiden) en el N de la Región Pampeana. In VIII CONFLAT y V Congreso Forestal Argentino (Mendoza, 27 al 30 de marzo de 2023).
- GORZYCKI, R. 2023. Informes de Cadenas de Valor: Forestal, papel y muebles. Junio 2023. Año 8 – N° 68. Ministerio de Economía. Argentina. 57 pp. ISSN 2525-0221
- KEITA, J.D. 1987. Wood or charcoal - which is better? *Unasylva* 39 (3-4)
- PATHAUER, P.; PALAZZINI, D. 2021 Evaluación del crecimiento inicial de procedencias locales de *Eucalyptus sideroxylon* (A. Cunn. ex Woolls) en el norte de la provincia de Buenos Aires. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos. 14 y 15 de octubre de 2021
- PUROHIT, A.N.; NAUTIYAL, A.R. 1987. Fuel wood value index of Indian mountain tree species, *Int. Tree Crops J.* 4: 177-182.
- RUIZ-AQUINO, F.; RUIZ-ÁNGEL, S.; SANTIAGO-GARCÍA, W.; FUENTE-CARRASCO, M.E.; SOTOMAYOR-CASTELLANOS, J. R.; CARRILLO-PARRA, A. 2019. Energy characteristics of wood and charcoal of selected tree species in Mexico. *Wood Res.* 64(1): 71-82.
- TARABORELLI, C.; PALAZZINI, D.A.; PATHAUER, S.P. 2024. Durabilidad natural en madera juvenil de *Eucalyptus sideroxylon* (A. Cunn. ex Woolls): primeros resultados en pudrición blanca. XXXVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos. 4 de octubre de 2024.



RESPUESTA INICIAL DE MATERIALES DE *Eucalyptus* EN LA CUENCA DEL SALADO

Jose BAROTTO¹; Manuel de HAGEN²; Bruno VARELA²; Dino PALAZZINI^{1,3}

RESUMEN

Se evaluó la respuesta inicial de cinco especies de eucaliptos en la Cuenca del Salado para determinar la aptitud potencial de las mismas. El estudio se realizó en el partido de Chascomús, Buenos Aires, en un establecimiento ganadero que presenta suelos de baja pendiente con limitaciones por rasgos hidromórficos. Las especies ensayadas fueron: *Eucalyptus tereticornis*, *E. sideroxylon*, *E. camaldulensis*, *E. dunnii* y *E. viminalis*, dispuestos en cortinas destinadas a montes de reparo. Se realizaron relevamientos de supervivencia a los 5 y 19 meses de edad, con una medición de altura en la segunda instancia. Tanto la supervivencia como la altura presentaron diferencias entre especies, siendo los “eucaliptos colorados” (*E. camaldulensis*, *E. tereticornis* y *E. sideroxylon*) los de mayor supervivencia (con diferencias entre ellos, más acentuadas a los 19 meses) y *E. viminalis* el de la menor, con *E. dunnii* en una situación intermedia. *E. tereticornis* y *E. dunnii* mostraron los mayores crecimientos en altura (2,84 m y 2,62 m, respectivamente), mientras que *E. sideroxylon* se ubicó en el extremo opuesto.

Palabras clave: *evaluación de materiales, monte de reparo, ganadería*

1. INTRODUCCIÓN

El género *Eucalyptus* L'Hér constituye uno de los principales representantes dentro de la actividad forestal mundial y en Argentina ocupa el segundo lugar de preponderancia luego del pino, con más de 460.000 ha cultivadas con diferentes especies, implantadas principalmente en las provincias mesopotámicas que, junto con la provincia de Buenos Aires, concentran alrededor del 90 % de la superficie cultivada con este género (Gorzycki, 2023). El programa de mejoramiento genético (PMG) de eucaliptos desarrollado por el INTA para la Mesopotamia Argentina tiene como objetivo general contribuir a mejorar las características deseables de los nuevos bosques cultivados de eucaliptos, a través de la selección de genotipos superiores en adaptabilidad, sanidad y atributos de crecimiento y aptitud, que generen productos de alto valor, y de este modo proveer semillas y clones de alta calidad genética (Harrand y Marcó, 2012). Trabajos realizados para la delimitación de áreas de aptitud climática para cultivo de eucaliptos en la región pampeana (Moschini et al., 2000) y aptitud de las tierras para eucaliptos en provincia de Buenos Aires (Nakama et al., 2000), indican que esta región tiene potencial para la producción con determinadas especies de eucaliptos. También estudios de índice de sitios en la cuenca demostraron la capacidad productiva de la misma para producciones forestales (Mazia & Rezzano, 1992).

La Pampa Deprimida –que incluye la Cuenca o Depresión del Salado y la Depresión de Laprida- se extiende en un área de 90.000 km², que ocupa el centro de la provincia de Buenos Aires. El clima es templado y húmedo, con una precipitación media anual de 900 mm, distribuidos regularmente a lo largo del año. Frecuentemente, la región se ve expuesta a inundaciones prolongadas, debido al relieve deprimido y a su escasa pendiente, y también sufre sequías generalmente estivales (León et al., 1984). Las características de los suelos de la región son un reflejo de la posición topográfica. Así, los suelos

¹ Laboratorio de Investigaciones en Madera (LIMAD), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

² Madirasi S.A. Área medioambiental. Chascomús, Buenos Aires. Contacto: madirasi@hotmail.com. Tel: 11-5767-9394

³ Instituto de Investigación de Recursos Biológicos - Centro de Investigaciones en Recursos Naturales - INTA CASTELAR

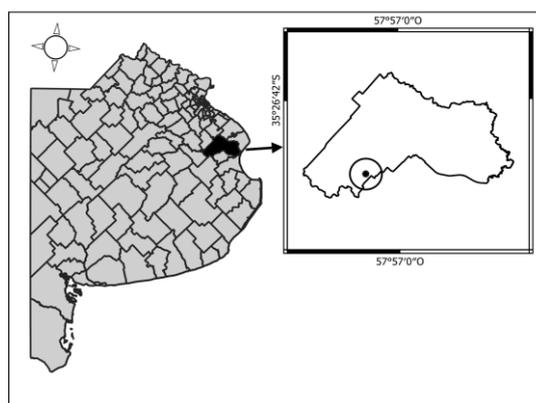


de loma y media loma tienen un horizonte orgánico de reacción levemente ácida, con limitaciones por excesos hídricos y un subsuelo arcilloso que determinan napas colgadas y a veces presencia de salinidad o alcalinidad. Los suelos de las posiciones más bajas pueden tener un horizonte orgánico en el caso de los bajos dulces y ausencia de este en los bajos alcalinos (Roitman y Preliasco, 2018). Estas características hacen la cuenca principalmente ganadera, donde la incorporación de los montes de reparo se está integrando de forma gradual a los planteos productivos, motivados principalmente por el bienestar animal, la fijación de carbono atmosférico para mejorar el balance del sistema, y en menor medida la producción de madera. Estos montes, dispuestos en macizos o cortinas, protegen al ganado e instalaciones frente a condiciones climáticas adversas. Los de mayor difusión son los montes de sombra y abrigo, que reducen el impacto del calor, aunque también brindan ventajas frente al frío y el viento cuando son manejados adecuadamente (Galarco y Ramilo, 2020).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta inicial de 5 especies del género *Eucalyptus*, implantadas en una zona actualmente marginal para la forestación, para establecer la aptitud potencial de estos materiales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La plantación se llevó a cabo en el establecimiento "La Amistad", ubicado en el Partido de Chascomús, Buenos Aires, Argentina ($35^{\circ} 46' S$; $58^{\circ} 08' O$), situado en el extremo norte de la región denominada Pampa Deprimida, caracterizada por ser una zona de llanuras loessicas de relieve suave y muy escasa pendiente. El drenaje de la zona en general es deficiente, lo que determina el estancamiento de las aguas en diversos bajos endorreicos (Dangavs et al., 2006).



Se trabajó con cinco especies del género *Eucalyptus*: *E. tereticornis*, *E. sideroxylon*, *E. camaldulensis*, *E. dunnii* y *E. viminalis*, las cuales provienen de huertos semilleros de progenies de los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus* para climas templados, especialmente para la provincia de Buenos Aires, del Instituto de Investigación de Recursos Biológicos del INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) Castelar.

Con el objetivo de desarrollar montes de reparo para la hacienda, en noviembre de 2023 se plantaron 1.978 plantas, distribuidas en 4 cortinas de 3 líneas y una de 2 líneas, compuesta cada una por un número similar de ejemplares de las 5 especies. Se plantó a 2 metros entre líneas 2,5 metros entre plantas de la línea, lo que está acorde con los marcos de plantación utilizados habitualmente para estas especies. La preparación del sitio constó de una doble rastreada de disco, luego de un barbecho químico. La plantación se realizó a pala y con cable plantador para homogeneizar el distanciamiento entre plantas. Se aplicó gel forestal dentro del pozo correspondiente a cada planta y se realizó un riego de asiento. El control de malezas se llevó a cabo mediante métodos químicos en la banda de plantación, con preemergente y gramínicida indicados para la producción forestal. A su vez, se aplicó un repelente orgánico para mamíferos, destinado a roedores, y el control de hormigas se realizó con cebo comercial, en forma puntual.

Se llevaron a cabo dos mediciones, una a los 5 meses de plantado el ensayo (abril de 2024) y otra a los 19 meses (junio de 2025). En la primera se realizó un censo de supervivencia, mientras que en la segunda se repitió el censo de supervivencia y también se censaron las alturas (inventario al 100 %). Para la determinación de la altura se utilizó una vara graduada, con una precisión de 0,1 metros.

Análisis estadístico

La supervivencia se analizó en ambos momentos, a través de un modelo mixto generalizado, siguiendo una distribución binomial, y un análisis de la varianza de los desvíos a través de chi-cuadrado y un test



de comparaciones múltiples de Tukey. Además, se analizó el cambio en esta variable entre ambos momentos. Para la altura se analizó la existencia de diferencias entre materiales mediante análisis de la varianza, general y por cuantiles, para los datos provenientes del censo a los 19 meses. El análisis de ambas variables fue llevado a cabo con el software R.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

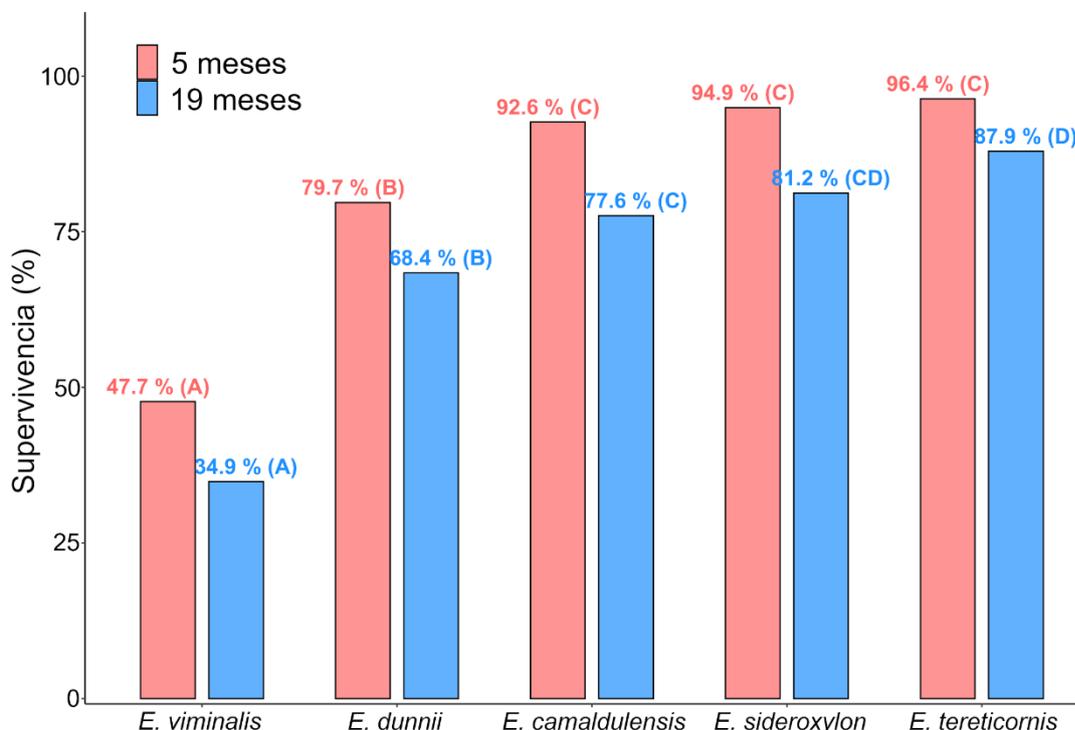


Gráfico 1. Supervivencia a los 5 y 19 meses desde la plantación para 5 especies de *Eucalyptus* implantados en la pampa deprimida. Letras diferentes indican diferencias significativas entre especies para un mismo momento.

En el Gráfico 1 se observa el resultado de la supervivencia para los dos momentos analizados (5 y 19 meses desde la plantación). De acuerdo con este análisis, a los 5 meses el grado de supervivencia general se mantuvo en torno al 83,4 %, y fue posible establecer diferencias significativas entre especies. Por otro lado, el gráfico 2 muestra las diferencias en altura entre especies: *E. tereticornis* y *E. dunnii* alcanzaron los mayores valores, mientras que *E. sideroxylon* presentó el menor crecimiento. Este patrón reafirma la necesidad de seleccionar especies no solo por supervivencia y crecimiento, sino también por el destino final de la madera.

Eucalyptus viminalis presentó la menor supervivencia (34,9 %) a los 19 meses, con una reducción del 12 % entre mediciones, mostrando una elevada mortalidad y limitada capacidad de adaptación. Estos resultados dejan en evidencia la sensibilidad de esta especie a la condición de anegamiento de algunos suelos de la Cuenca del Salado, como reportan Nakama et al. (2000). En cuanto a la altura, Ferrere et al. (2014) reportan para suelos de mejor aptitud crecimientos entre 1,47 y 2,55 m/año, mientras que en este trabajo el desarrollo fue apenas menor (2,15 m a los 19 meses). Por otro lado, *Eucalyptus dunnii* alcanzó valores intermedios de supervivencia (aproximadamente 80 % a los 5 meses y apenas por encima del 68 % a los 19 meses), por lo que se mantiene como una alternativa viable. En cuanto a la altura, muestra un crecimiento promedio de 2,62 m a los 19 meses, lo que está en relación con valores reportados por Achinelli et al. (2017) para la región, que oscilan entre 1,33 y 2,6 m/año según el sitio considerado. Eluchans (2018) reporta el potencial de la especie para la zona por su rápido crecimiento, siempre condicionado a la correcta elección del material genético y preparación del sitio.

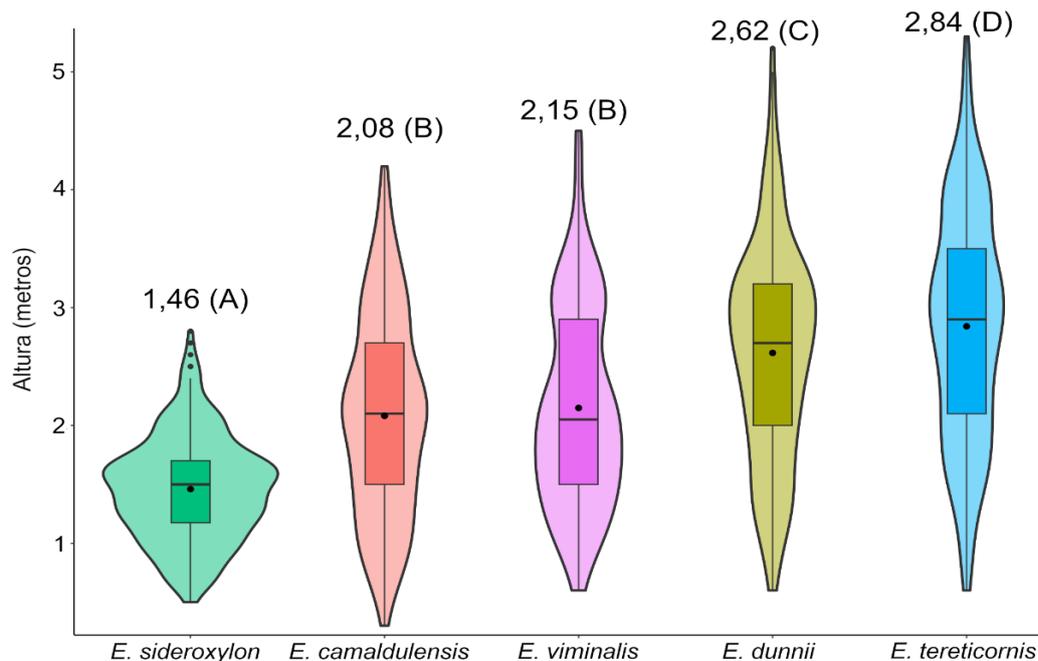


Gráfico 2. Variación en altura para las 5 especies de *Eucalyptus* evaluadas en la cuenca del Salado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre especies para un mismo momento.

Los denominados “eucaliptos colorados” (*E. camaldulensis*, *E. sideroxylon* y *E. tereticornis*) conformaron el grupo de mayor supervivencia (mayor al 92 % a los 5 meses), mientras que a los 19 meses se diferenciaron sus respuestas. En el caso de *Eucalyptus camaldulensis*, su supervivencia inicial elevada y la moderada caída de esta a los 19 meses concuerda con antecedentes que destacan su rusticidad y plasticidad a condiciones de sequía e hidromorfismo (Nakama et al., 2000). A los 19 meses, el crecimiento promedio en altura fue de 2,08 m, lo cual muestra relación con los datos obtenidos por Craig y Momo (2012) y Borzone et al. (2007), que indican crecimientos anuales alrededor de 1,2 m. *Eucalyptus sideroxylon* presentó una elevada supervivencia a los 5 meses (94,9 %) y una disminución intermedia a los 19 meses. El crecimiento promedio en altura fue el menor (1,46 m), lo que concuerda con ensayos recientes donde se muestra que el crecimiento inicial en altura suele ser inferior al de otras especies de eucaliptos (Pathauer y Palazzini, 2021). Este crecimiento inicial está compensado por su valor en cuanto a la durabilidad natural de la madera, lo que la hace atractiva para la provisión de postes y madera para construcciones rurales. Por su parte, *Eucalyptus tereticornis* combinó elevada supervivencia (96,4 % y 87,9 % a los 5 y 19 meses, respectivamente) y mayor crecimiento en altura (2,84 m a los 19 meses). Marraro et al. (2024) muestran, para la región pampeana, crecimientos en altura al año cercanos a los 2 metros, coincidiendo con los crecimientos mostrados en este estudio.

4. CONCLUSIONES

Las dos variables analizadas son de gran importancia para la elección de especies, lo cual va de la mano con el destino del monte. De los materiales ensayados, los “eucaliptos colorados” (*E. tereticornis*, *E. sideroxylon* y *E. camaldulensis*) son los que mostraron diferencias estadísticamente significativas en cuanto a supervivencia, siendo, *a priori*, los más indicados para su utilización para el establecimiento de montes de reparo en la Pampa Deprimida. Por otro lado, en cuanto al crecimiento en altura para estas especies, la respuesta fue dispar, con *E. tereticornis* mostrando el mayor desarrollo, mientras que las otras dos especies presentaron menores crecimientos, con *E. sideroxylon* destacándose por su baja velocidad de arranque. Es importante destacar que la provincia de Buenos Aires sufrió un período de sequía entre 2022 y 2023 que, según algunas fuentes, fue el peor de las últimas décadas y coincidió con el período de instalación del ensayo, por lo que es esperable que estos resultados resulten una especie de “piso” para estos materiales, con mejores perspectivas frente a condiciones agroclimáticas más favorables.



AGRADECIMIENTOS

A la empresa Estela Holmberg S.A. y al administrador del establecimiento, Carlos Lucio Aragón, por el apoyo para la realización de este ensayo.

5. REFERENCIAS

- ACHINELLI, F.; GALARCO, S.; PÉREZ, F.; CIOCHINI, G.; GONZÁLEZ, A.; DONNA, F. 2017. Crecimiento de *Eucalyptus dunnii* Maiden en el noreste de la pampa deprimida de Buenos Aires. XXXI Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, Argentina.
- BORZONE, H.A.; BARDI, J.F.; LADDAGA, J.E. 2007. Crecimiento de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh cultivado como cortina en un establecimiento agropecuario del Partido de Azul (Pcia. de Bs. As.). *Quebracho (Santiago del Estero)* (14): 65-73.
- CRAIG, E., MOMO, F. 2012. Crecimiento de *Eucalyptus camaldulensis* DEHNH. En relación a atributos edafoambientales a nivel de micrositio en Luján, Buenos Aires, Argentina. *Ciencia & Investigación Forestal*, 18(3), 35-50.
- DANGAVS, N.V.; MERLO, D.O.; MORMENEO, M.L. 2006. Geolimnología de los cuerpos lénticos de la cuenca del arroyo "La Vigilancia", Chascomús, Provincia de Buenos Aires. *Revista del Museo de La Plata, Geología*, 12 (115): 1-29.
- ELUCHANS, S. 2018. Producción de plantines de *Eucalyptus dunnii* Maiden para realizar una forestación en un establecimiento ganadero en la localidad de Chascomús, Buenos Aires, Argentina [Trabajo final de grado, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata].
- FERRERE, P.; LUPI, A.M.; BOCA, R. 2014. Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill. *Quebracho* 22(1-2): 100-113.
- GALARCO, S.P.; RAMILO D. 2020. Plantaciones forestales en Argentina: Fundamentos técnicos y metodologías para la realización de forestaciones en diferentes regiones.
- GORZYCKI, R. 2023. Informes de Cadenas de Valor: Forestal, papel y muebles. Junio 2023. Año 8 – N° 68. Ministerio de Economía. Argentina. 57 pp. ISSN 2525-0221.
- HARRAND, L.; MARCÓ, M.A. 2012. Investigación hacia el desarrollo de material genético tolerante al frío. XXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Octubre 2012. Concordia Entre Ríos.
- LEÓN, R.J.; RUSH G.M.; OESTERHELD M. 1984. Pastizales pampeanos – impacto agropecuario. *Phytocoenología* 12: 201-218.
- MARRARO ACUÑA, F.; CORA, A.; HARRAND, L.; CHIACCHIERA, S. 2024. Evaluación de especies y clones de eucaliptos en suelos agrícolas de la provincia de Córdoba – Argentina. XXXVIII Jornada Forestal de Entre Ríos (pp. 35-42). INTA.
- MAZIA, N.; REZZANO, C. 1992. Evaluación de las calidades de sitio para *Eucalyptus camaldulensis* en suelos hidrohalomórficos de la región de la cuenca del Río Salado - Pcia. de Buenos Aires - Argentina.
- MOSCHINI, R.; CONTI, H. 2000. Aptitud de las tierras para eucalyptus con fines para planeamiento regional en la provincia de Buenos Aires. *SAPyA Forestal*. 16. 2000, p. 2-11
- NAKAMA, V.; ALFIERI, A.; RODRIGUEZ TRAVERSO, J.; ALEKSA, A.; MOSCHINI, R.; CONTI, H. 2000. Aptitud de las tierras para eucalyptus con fines para planeamiento regional en la provincia de Buenos Aires. *SAPyA Forestal*. 16. 2000, p. 2-11.
- PATHAUER, P.; PALAZZINI, D. 2021. Evaluación del crecimiento inicial de procedencias locales de *Eucalyptus sideroxylon* (A. Cunn. ex Woolls) en el norte de la provincia de Buenos Aires. XXXV Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Argentina.
- ROITMAN, G.; PRELIASCO, P. 2018. Guía de reconocimiento de herbáceas de la Pampa Deprimida. Características para su manejo. Segunda edición. Kit de extensión para las Pampas y Campos. Buenas prácticas para una ganadería sustentable de pastizal. Fundación Vida Silvestre Argentina.



CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE 7 TAXONES DE PINO MEDIANTE TÉCNICAS ACÚSTICAS

Rosa A. WINCK^{1,2*}; Diego R. AQUINO¹; Ector C. BELABER¹; Hugo E. FASSOLA¹; Christian BULMAN HARTKOPF³; Benjamín de J. GOMEZ²; Adelaida BRAGAÑOLO²

RESUMEN

Se determinaron algunas propiedades físicas y mecánicas de la madera aserrada de siete taxones de pino (*Pinus* spp.) obtenidos de una red de ensayos. Se utilizaron 488 tablas aserradas. Para la evaluación de la madera se utilizaron métodos no destructivos (MND) y métodos destructivos (MD). La determinación del módulo dinámico por resonancia se realizó en tablas verdes (MOE_{IV}) y secadas en cámara (MOE_{rs}), mientras que la técnica de vibración transversal (Metriguard) fue empleada para la evaluación de la madera seca, determinándose el módulo de elasticidad (MOE_{Met}) y la densidad estacionada (DE_{Met}). Para establecer la correlación entre MND y MD, se seleccionó una muestra de 175 tablas, las mismas fueron ensayadas a la flexión estática en una máquina universal, determinando el módulo de elasticidad (MOE_e) y el módulo de rotura (MOR). El análisis de los datos permitió caracterizar la variabilidad entre taxones y la aptitud para aplicaciones estructurales, destacándose el taxón F₂ de procedencia australiana por sus propiedades mecánicas superiores, seguido por los taxones PT y PEE de origen nacional. Esta información resulta fundamental para orientar la selección de taxones para su cultivo según usos específicos.

Palabras clave: *madera estructural, materiales genéticos, métodos no destructivos.*

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades de la madera varían considerablemente debido a una compleja interacción de factores genéticos y ambientales (Coronel, 1994). El conocimiento detallado de estas variaciones entre materiales genéticos permite optimizar la selección de especies y genotipos para programas de forestación y, consecuentemente, promover un aprovechamiento más racional de los recursos maderables. En las provincias de Misiones y Corrientes, principales polos foresto-industriales de Argentina, especies como *Pinus taeda* L. (PT), *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm. (PEE) y la primera (F₁) y segunda (F₂) generación del híbrido entre *Pinus elliottii* var. *elliottii* y *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) Barrett and Golfari (PCH), son las preferentemente seleccionadas para el establecimiento de plantaciones comerciales. Esta elección se basa en su destacado crecimiento (Belaber et al., 2018). Si bien existen antecedentes científicos que describen las propiedades físicas y mecánicas de PT y PEE (Winck, 2013; Fank, 2018), la información disponible para otros taxones como PCH y las generaciones F₁ y F₂ del híbrido PEE×PCH es escasa, en particular, sobre su aptitud para usos estructurales (Pereyra et al., 2007; Rotundo, 2021; Winck, 2023). En cuanto a las retrocruzas de PEE×PCH por sus parentales (F₁×PCH y PEE×F₁), cuya producción local se encuentra en una fase de desarrollo, la investigación se ha centrado principalmente en aspectos como la calidad de los rollizos en relación con características de la canopia (Belaber et al., 2022), el rendimiento en el aserrado de trozas basales (Belaber et al., 2023) y la clasificación de la madera aserrada por grados de calidad, apariencia y remanufactura (Winck et al., 2024). Sin embargo, se identificó una vacancia de conocimiento respecto a las propiedades que definen la calidad estructural de la madera proveniente de estos taxones de desarrollo local. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo principal determinar y comparar la densidad y el

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

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

³ INTA, CONICET, EEA Montecarlo, Misiones, Argentina.



módulo de elasticidad de la madera aserrada de siete taxones de pino (*Pinus* spp.) provenientes de un ensayo local. El propósito fue caracterizar la madera de estos materiales genéticos y determinar si hay diferencias significativas entre ellos, con el fin de aportar información técnica relevante para orientar la selección de taxones para su cultivo según usos específicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético se obtuvo de un ensayo de 18 taxones de *Pinus* spp., establecido en 1996 en la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) INTA Cerro Azul, Misiones, Argentina (27°39'18.89"S, 55°25'48.80"O). El ensayo no recibió tratamientos silvícolas como raleos o podas. En este estudio se evaluaron 7 taxones de pino. Cinco de ellos fueron introducidos desde CSIRO (Australia): *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PCH), las generaciones F₁ y F₂ del híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PEE×PCH), y las retrocruzas de este híbrido por sus parentales (F₁×PCH y PEE×F₁). Los dos materiales genéticos restantes son de origen local: *Pinus elliottii* var. *elliottii* (PEE), del huerto semillero clonal (HSC) del INTA Cerro Azul, Misiones, y *Pinus taeda* (PT), procedencia Marion County del HSC de Arauco SA, Misiones. El diseño experimental correspondió a bloques completos al azar con 4 repeticiones. Cada taxón (tratamiento) se estableció en parcelas cuadradas de 25 árboles, con un espaciamiento de 3 m × 3 m. Información detallada sobre los materiales genéticos y las características del sitio del ensayo se encuentra en Cappa et al. (2013).

A los 23 años, se apearon 42 árboles, correspondientes a 6 individuos por taxón. La selección de estos árboles se realizó considerando tres estratos: dos dominantes (D), dos codominantes (CD) y dos suprimidos (S) por taxón. Detalles adicionales sobre las variables dasométricas de los árboles seleccionados pueden consultarse en Winck et al. (2024). De cada árbol apeado se extrajo un rollizo basal de 3,10 m de longitud. Estos rollizos fueron transportados a la industria (Figura 1a) donde se procesaron para obtener tablas de 1" de espesor y anchos variables (Figura 1b), resultando en un total de 488 piezas de madera aserrada.



Imagen 1. Trozado de rollizos basales y transporte a la industria (a), tablas aserradas para ensayos no destructivos y destructivos (b).

Cada pieza aserrada, debidamente identificada, fue evaluada en estado "verde" (luego de 48 horas de apeo) y en estado seco (luego del secado en cámara hasta alcanzar un contenido de humedad (CH) promedio del 12 %). Para la evaluación en estado verde del MOE_v se utilizó el *software* "Lumber Grader" incorporado a una Tablet para calcular el módulo de elasticidad dinámico por resonancia mediante la siguiente expresión: $MOE_{rv} = densidad * V^2$ (1). La densidad verde promedio se determinó a partir de una muestra aleatoria de tablas, obteniéndose mediante la relación entre el peso y el volumen de la pieza, considerando además que en condiciones saturadas la densidad es prácticamente constante (Wielinga et al., 2009). Se utilizó el valor promedio de 850 kg/m³ y la velocidad del sonido fue determinada con la longitud de la pieza y la frecuencia fundamental longitudinal según la siguiente ecuación: $Vel = 2 * frec * L$ (2). Previo a la evaluación en estado seco, se midieron en cada tabla sus dimensiones con cinta métrica, el contenido de humedad (CH) con un xilohigrómetro digital marca Marrari modelo M51, y para la medición de la densidad estacionada (DE_{Met}) y módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal (MOE_{Met}) se utilizó el equipo Metriguard® E-Computer, Modelo 340. También se determinó el módulo de elasticidad dinámico por resonancia (MOE_{rs}), empleando el valor promedio de la DE_{Met} correspondiente a cada taxón.



De las 488 tablas evaluadas de forma no destructivamente, se seleccionó una muestra aleatoria de 175 piezas con valores de MOE_{Met} mayor a 7 GPa para los ensayos destructivos. En propiedades a la flexión estática se evaluaron el módulo de elasticidad estático (MOE_e) y el módulo de rotura (MOR). Los ensayos se realizaron sobre las piezas en sus dimensiones originales, utilizando una máquina universal de ensayos electromecánica marca DIDACTA® (Italia), con capacidad de 300 kN y una resolución de 300 N. Se empleó el *software* "MetroCom"-Dina 960 xp. El procedimiento siguió las especificaciones de la norma IRAM 9663 (2013) para madera estructural.

El análisis de los datos se realizó con el *software* InfoStat® (Di Rienzo et al., 2020). Se calcularon estadísticas descriptivas para todas las variables evaluadas. Se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la existencia de diferencias significativas entre las propiedades de los distintos taxones y la comparación de medias mediante la prueba DGC (Di Rienzo et al., 2002). El grado de asociación lineal entre las variables obtenidas mediante técnicas no destructivas y destructivas, en forma conjunta de todos los materiales considerados, se evaluó a través del coeficiente de correlación de Pearson (r). En todos los análisis se empleó un nivel de significancia del 5 %.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El contenido de humedad promedio de las piezas evaluadas fue de 10,8 % con una variación entre 7 % y 14 %.

El análisis de variancia permitió establecer diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para las variables MOE_{rv} , MOE_{rs} , MOE_{Met} , DE_{Met} con valores de $p \leq 0,05$. La prueba de comparación de medias de las distintas variables permitió identificar al taxon híbrido F_2 como el material genético más adecuado para usos estructurales, con menores valores para el MOE_{rv} y mayores valores de MOE_{rs} , MOE_{Met} y DE_{Met} .

En el Cuadro 1 se presentan la comparación de media entre taxones para las variables estudiadas con técnicas no destructivas para la totalidad de las piezas evaluadas. Los valores medios de MOE_{rs} , MOE_{Met} y DE_{Met} en las tablas secas fueron superiores a 9 GPa y 500 kg/m³, respectivamente. Todos los taxones arrojaron valores de MOE y de densidad que superan a lo indicado para clase 2 de resistencia estructural (>7 GPa y >390 kg/m³, respectivamente), incluso en la clasificación por densidad todos los taxones, a excepción del PCH, superan valores establecidos para la clase 1 (420 kg/m³) (IRAM 9662-3, 2015).

Cuadro 1. Comparación de medias para la densidad y módulos de elasticidad dinámicos

Trat	Taxones	MOE_{rv} (GPa)			MOE_{rs} (GPa)			MOE_{Met} (GPa)			DE_{Met} (kg/m ³)		
		n	Medias	E.E.	n	Medias	E.E.	n	Medias	E.E.	n	Medias	E.E.
1	PT	75	15,45 b	0,81	62	12,89 b	0,57	69	10,46 b	0,43	66	562 b	9,41
2	PEE	45	16,68 b	1,05	36	12,26 b	0,74	42	10,26 b	0,56	41	544 b	11,93
3	PCH	63	17,65 a	0,89	58	11,12 c	0,59	60	9,00 b	0,47	57	501 c	10,12
4	F1	89	18,29 a	0,75	85	12,99 b	0,48	87	9,47 b	0,39	86	545 b	8,24
5	F2	59	16,63 b	0,92	49	14,60 a	0,64	55	11,73 a	0,49	52	612 a	10,60
6	$F_1 \times PCH$	80	19,64 a	0,79	76	12,11 b	0,51	77	10,34 b	0,41	76	534 b	8,76
7	$PEE \times F_1$	67	18,99 a	0,86	62	12,44 b	0,57	67	9,51 b	0,44	64	567 b	9,55

Nota: Trat.: Tratamientos, MOE_{rv} y MOE_{rs} : Módulo de elasticidad dinámico determinado por resonancia en condiciones verdes y secas, respectivamente, MOE_{Met} : Módulo de elasticidad dinámico determinado por vibración transversal, DE_{Met} : Densidad estacionada obtenida con el equipo Metriguard (kg/m³), n: cantidad de piezas evaluadas, E.E.: error estándar, Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Se puede apreciar que los valores promedios de módulo de elasticidad dinámico determinado por resonancia en condiciones húmedas (MOE_{rv}) varían en 4,19 GPa entre materiales genéticos, con el menor y mayor valor el PT y $F_1 \times PCH$, respectivamente (Cuadro 1). Este valor es orientativo e inverso al comportamiento de la madera en condiciones estacionadas, como se puede observar en los valores



de r entre variables (Cuadro 2) y se debe al elevado contenido de humedad, por encima del punto de saturación de fibras ($CH > 30\%$) de las tablas aserradas. Considerando que el módulo dinámico en tablas en su estado verde es estimado a partir de los valores de la velocidad del sonido y de la densidad, y, que un mayor contenido de humedad implica una disminución de la velocidad del sonido (Panosso-Perlin et al., 2015) pero un aumento sustancial en la densidad verde (Fathi et al., 2020), lo que resulta en un mayor valor de módulo de elasticidad dinámico (MOE_d) determinado en estas condiciones. Menores valores MOE_d en condiciones verdes para los taxones PT, PEE y F_2 de PEE×PCH nos permite interpretar que contienen menor cantidad de agua por m^3 de material sólido.

Los resultados encontrados señalan que todos los materiales podrían ser aptos en construcciones estructurales donde se acepten clase 2 de resistencia. También se puede apreciar que PCH presentó menores valores de densidad y módulos dinámicos, esto indica un comportamiento estructural inferior respecto a los demás materiales evaluados.

En el Cuadro 2 se presentan los coeficientes de correlación (r), donde es posible observar la relación existente entre variables, siendo en todos los casos altamente significativas ($p \leq 0,01$) y positiva, a excepción del MOE_{rv} que es negativa. El mayor grado de asociación fue observado entre las variables MOE_{Met} - MOE_e ($r=0,89$), esto indica que se podría recurrir al método de vibración transversal como un método adecuado para estimar otras propiedades mecánicas como el MOE_e , MOR, MOE_{rs} .

Cuadro 2. Correlación de Pearson (r) entre las distintas variables (bajo la diagonal) y significancia estadística (sobre la diagonal).

Coefficientes / Probabilidades	MOE_{rv}	MOE_{rs}	MOE_{Met}	DE_{Met}	MOR	MOE_e
MOE_{rv}	1	0,0000	0,0000	0,0002	0,0000	0,0000
MOE_{rs}	-0,37	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
MOE_{Met}	-0,41	0,71	1	0,0000	0,0000	0,0000
DE_{Met}	-0,32	0,35	0,65	1	0,0000	0,0000
MOR	-0,36	0,61	0,74	0,64	1	0,0000
MOE_e	-0,41	0,77	0,89	0,61	0,80	1

Nota: MOE_{rv} y MOE_{rs} : Módulo de elasticidad dinámico determinado por resonancia en condiciones verdes y secas, respectivamente, MOE_{Met} : Módulo de elasticidad dinámico determinado por vibración transversal, DE_{Met} : Densidad estacionada obtenida con el equipo Metriguard, MOR: Módulo de rotura, MOE_e : Módulo de elasticidad a la flexión estática.

Estos resultados demuestran claramente que se pueden emplear las técnicas no destructivas, principalmente la de vibración transversal, para estimar la rigidez real de la pieza independientemente de la especie y es coincidente con lo expresado por otros autores (França et al., 2018, 2019; Winck et al., 2022, Winck, 2023).

4. CONCLUSIONES

La madera obtenida de los ensayos de los taxones evaluados puede ser considerada apta para fines estructurales donde se requieran madera de calidad de clase 2.

El taxón pino híbrido F_2 (*Pinus elliotii* var. *elliotii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*), procedente de Australia, en comparación con los demás materiales genéticos evaluados, arrojó valores mayores de densidad y módulo de elasticidad dinámico, esto lo posiciona en condiciones de superioridad para fines estructurales, seguidos por *Pinus taeda* y *Pinus elliotii* de origen nacional.

Dado el alto grado de asociación entre el módulo de elasticidad dinámico obtenido por vibración con el módulo de elasticidad estático, se podrían utilizar los métodos de clasificación mecánica no destructiva para determinar la rigidez de la madera con un nivel de precisión aceptable.

5. LITERATURA CITADA

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 elliotii* var. *elliotii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* F_1 hybrid in Argentina. Forest Science, 64(6):595-608.

BELABER E., WINCK R.A., GAUCHAT M.E., ROTUNDO C., BULMAN C., FASSOLA H.E. 2022. Productividad,



- calidad potencial de rollizos y características de la canopia en taxones de pinos en Misiones, Argentina. Artículo 293 en Revisión Revista Quebracho. FCF-UNSE. Pp 12.
- BELABER EC, WINCK RA, ROTUNDO CA, BULMAN C, AQUINO DR, GAUCHAT ME, FASSOLA HE. 2023. Rendimiento total en el aserrado de trozas basales de taxones de pinos del NE de Argentina. Inédito. VIII Congreso Forestal Latinoamericano y V Congreso Forestal Argentino. Pg. 596-599.
- CAPPA EP, MARCO M, GARTH NIKLES D, LAST IS. 2013. Performance of *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea*, their F₁, F₂ and backcross hybrids and *Pinus taeda* to 10 years in the Mesopotamia Region, Argentina. *New Forests* 44(2):197–218.
- CORONEL E. 1994. Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas. 1ra parte: Fundamentos de las propiedades mecánicas de las maderas. Instituto de Tecnología de la Madera, editor. Santiago del Estero, Argentina.; 335 p.
- DI RIENZO, J.A., GUZMÁN, A.W., CASANOVES, F. 2002. A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 7(2), 129-142.
- 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.
- FATHI, H., NASIR, V., KAZEMIRAD, S. 2020. Prediction of the mechanical properties of wood using guided wave propagation and machine learning. *Construction and Building Materials*, 262, 120848.
- FANK, P.Y. 2018. Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliotti*) cultivado en el nordeste argentino para uso estructural. Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Concepción del Uruguay; 2018.
- FRANÇA, T.S.F.A., F.J.N. FRANÇA, R.D. SEALE, SHMULSKY R. 2018. Bending strength and stiffness of No. 2 grade southern pine lumber. *Wood Fiber Sci.* 50(2):1–15.
- FRANÇA, F.J.N., SEALE, R.D., SHMULSKY, R., FRANÇA, T.S.F.A. 2019. Assessing southern pine 2 4 and 2 6 lumber quality: longitudinal and transverse vibration. *Wood Fiber Sci*, 51(1):1-14.
- IRAM 9662-3. 2015. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotti (*Pinus taeda* y *elliottii*). Inst Argentino Norm y Certificación, Buenos Aires. 1–15.
- IRAM 9663. 2013. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- PANOSSO PERLIN, L.; ANDRADE PINTO, R.C.; DO VALLE, A. 2015. Ultrasonic testing with different orientations throughout cross section of *Eucalyptus grandis*. *Proceedings: 19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*. Pp 59-66.
- PEREYRA O, SUIREZS M.T., BOBADILLA EA, REDKA L, KAHLSTORF E. 2007. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la Madera del híbrido *Pinus elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y su comportamiento en la elaboración de productos remanufacturados. Proyecto UNAM. Código ISIF: II – 15. Código Incentivo: 16/F064.
- ROTUNDO, C.A. 2021. Estimación de parámetros genéticos de la calidad de la madera en árboles de pino híbrido (*Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) utilizando metodologías no destructivas. Tesis de maestría.
- WINCK, R.A. 2013: Influencia del raleo sobre las características anatómicas y las propiedades físicas y mecánicas de la madera de *Pinus taeda* L. de la región NE de la Argentina. Tesis de Maestría. 102 p.
- 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. 2023. Calidad estructural de la madera de pino híbrido F₁ *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* basada en métodos no destructivos. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones. Pp. 222.
- WINCK, R.A., BELABER, E.C., AQUINO, D.R., BULMAN HARTKOPF, C., ROTUNDO, C.A., GAUCHAT, M.E., FASSOLA, H.E. 2024. Rendimiento en el aserrado por grados de calidad para apariencia y remanufactura en taxones de pinos en el Noreste de Argentina. *Revista Forestal Yvyretá* 32:1-21.
- WIELINGA, B., RAYMOND, C.A., JAMES, R., MATHESON, A.C. 2009. Effect of green density values on *Pinus radiata* stiffness estimation using a stress-wave technique. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 39(1), 71-79.



PREDICCIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO A PARTIR DE VIBRACIÓN TRANSVERSAL

Rosa A. WINCK^{1,2*}; Ector C. BELABER¹; Benjamín de J. GOMEZ²; Diego R. AQUINO¹; Christian BULMAN HARTKOPF³; Adelaida BRAGAÑOLO²; Hugo E. FASSOLA¹.

RESUMEN

La rigidez de la madera es una propiedad mecánica importante que determina su idoneidad para la construcción, por lo que, predecir el módulo de elasticidad mediante técnicas acústicas resulta beneficioso para los productores forestales. Mediante el método de vibración transversal se determinó el módulo de elasticidad dinámico (MOE_v) de la totalidad de las tablas aserradas de escuadrías comerciales de 7 taxones de pino. Posteriormente, sobre una muestra de 175 piezas con valores de MOE_v superior a 7 GPa se determinó la densidad estacionada, el módulo de rotura (MOR) y de elasticidad (MOE_e) a la flexión estática. Se desarrolló una ecuación para predecir el MOE_e a partir del MOE_v . Se determinó a través de un análisis de variancia que existen diferencias estadísticas significativas entre taxones, con valores superiores de MOE_e y densidad estacionada para *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* y el híbrido de segunda generación de *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. La técnica de vibración transversal resultó eficiente para predecir el módulo de elasticidad estático de la madera. Para todos los taxones las propiedades evaluadas fueron superiores a los valores establecidos para la clase 1 de resistencia estructural según la normativa argentina para pinos resinosos.

Palabras clave: *Propiedades mecánicas, técnicas acústicas, densidad, calidad.*

1. INTRODUCCIÓN

Las provincias de Misiones y Corrientes constituyen la región foresto-industrial más importante de Argentina, cuenta con extensa superficie plantada principalmente con especies del género *Pinus*. La necesidad de optimizar el uso de esta madera, especialmente para fines estructurales, ha impulsado la investigación en métodos no destructivos. Estos métodos, buscan predecir propiedades mecánicas clave, como el módulo de elasticidad estático (MOE_e), lo que resulta fundamental para la clasificación estructural y la valoración del recurso forestal. La estimación del MOE_e se basa en la correlación existente entre esta propiedad de la madera con otras que resultan más fáciles, rápidas y económicas de medir, tales como la densidad, módulo dinámico obtenido con diferentes técnicas acústicas, como resonancia, vibración transversal y longitudinal, que permiten obtener esos parámetros a través del análisis de las ondas de esfuerzos generadas por impactos. Cuando se integran una combinación de múltiples variables predictoras como la velocidad de la onda acústica, densidad de la madera, características de los nudos, ancho de los anillos de crecimiento, posición de la pieza en la troza y la edad, pueden mejorar la precisión de los modelos. Para *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* del noreste argentino, se confirmó una asociación significativa ($R^2 = 0,85$) entre el módulo dinámico calculado con la frecuencia de vibración longitudinal utilizando el equipo *Portable Lumber Grader* (PLG) y módulo estático obtenido con máquina universal de ensayo (Fank et al., 2017; Fank, 2018). Asimismo, investigaciones llevadas a cabo con madera de *P. elliottii* de 27 años cultivado en Uruguay, hallaron un coeficiente de determinación de 0,92 entre MOE_e y MOE dinámico calculado a partir de la onda de impacto utilizando el equipo *Microsecond Timer* de Fakopp® (Quagliotti et al., 2019). Por otro lado, en

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

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

³ INTA, CONICET, EEA Montecarlo, Misiones, Argentina.



madera aserrada de pino híbrido (*Pinus elliotii* var. *elliotii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PEE×PCH)) se han encontrado asociaciones significativas entre módulo estático y módulo dinámico obtenido con equipos portátiles de medición acústica, por ondas de esfuerzo “stress wave timer” (con *Tree Sonic* de Fakopp®) ($R^2=0,72$) y vibración transversal (Metriguard®) ($R^2=0,74$) (Winck, 2023; Winck et al., 2022). La estimación del MOE_e a partir de otras variables es considerado de importancia estratégica para la cadena de valor foresto-industrial debido principalmente a que, permite la clasificación mecánica de la madera aserrada según su rigidez de forma rápida y no destructiva. Clasificar la madera por calidad estructural aumenta su valor, ya que las piezas aptas para este fin ($MOE > 7$ GPa) tienen un precio de mercado superior al de la madera para usos secundarios. Esto mejora la rentabilidad de los aserraderos y, al garantizar sus propiedades mecánicas, aumenta la confianza del consumidor en la madera de pino de la región como material de construcción. El objetivo de este trabajo fue determinar la densidad estacionada, el MOE_v , el MOE_e y el MOR a la flexión estática de la madera de 7 taxones de pino y desarrollar una ecuación que relacione la rigidez de la madera obtenida con máquina universal de ensayo y con el equipo Metriguard.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material utilizado se obtuvo de un ensayo de *Pinus spp.* implantado en el año 1996 en la propiedad del INTA Cerro Azul, Misiones ($27^{\circ}39'18.89''S$, $-55^{\circ}25'48.80''O$), que no había sido raleado ni podado. De los 18 taxones existentes se seleccionaron 7 para evaluar la calidad de la madera. Cinco de ellos fueron introducidos desde CSIRO (Australia): *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PCH), las generaciones F_1 y F_2 del híbrido *Pinus elliotii* var. *elliotii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* (PEE×PCH), y las retrocruzas de este híbrido por sus parentales (F_1 ×PCH y PEE× F_1). Los dos materiales genéticos restantes son de origen local: *Pinus elliotii* var. *elliotii* (PEE), del huerto semillero clonal (HSC) del INTA Cerro Azul, Misiones, y *Pinus taeda* (PT), procedencia Marion County del HSC de Arauco SA, Misiones. El diseño de plantación corresponde a cuatro bloques con tratamientos distribuidos al azar en parcelas cuadradas de 25 árboles implantados a un distanciamiento de 3 m × 3 m. A los 23 años, cada tratamiento fue estratificado en tres grupos teniendo en cuenta su distribución diamétrica. Luego dentro de cada estrato se seleccionaron al azar 2 individuos, totalizando 6 individuos por tratamiento y 42 árboles en total. El material seleccionado fue apeado. De las trozas basales de 3,10 m de longitud, se obtuvieron 488 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) obtenido con xilohigrómetro digital marca Marrari modelo M51. Luego, con el equipo Metriguard® E-Computer Modelo 340 se determinó el módulo de elasticidad dinámico por vibración transversal (MOE_v). Finalmente, para comparar dos métodos de evaluación de la calidad estructural y analizar las propiedades de la madera, se eligieron 25 tablas laterales de cada taxón, todas con un MOE_v superior a 7 GPa. Este criterio se fijó teniendo en cuenta la norma IRAM 9662-3 (2015), donde se especifican los límites de tolerancia de las características visuales, como por ejemplo nudos, médula y resina para las clases 1 y 2 de la madera de pino resinoso para uso estructural. Por otra parte, se excluyeron las piezas con presencia de médula, que a su vez contienen mayor contenido de resina. Estos factores afectan negativamente a la resistencia mecánica, al igual que los nudos, y, por otro lado, interfieren con las ondas acústicas (Fank et al., 2017; Winck, 2023). Sobre la muestra seleccionada se determinó el módulo de elasticidad (MOE_e) y el módulo de rotura (MOR) a la flexión estática utilizando una máquina electromecánica universal de ensayos DIDACTA®, siguiendo el procedimiento indicado en la norma IRAM 9663 (2013). Luego se ajustó una regresión simple para estimar el MOE_e a partir del MOE_v obtenido por vibración. A su vez, de estas muestras se determinó en el laboratorio la densidad estacionada.

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 determinar la existencia de diferencias significativas entre taxones y la comparación de medias mediante la prueba DGC (Di Rienzo et al., 2002). Se realizó un análisis de regresión lineal simple para estimar el MOE_e a partir del MOE_v . La bondad de ajuste del modelo de regresión se verificó teniendo en cuenta el coeficiente de determinación ajustado (R^2_{aj}), el p -valor y el análisis de los residuales. Se empleó un nivel de significancia del 5 %.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de variancia permitió establecer diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para las variables MOE_e y densidad estacionada con valores de $p \leq 0,05$, mientras el valor del MOR no mostró diferencias estadísticas entre tratamientos ($p > 0,05$). La prueba de comparación de medias arrojó valores superiores de MOE_e y de densidad estacionada para los taxones PT, PEE e híbrido F₂, posicionándolos como más adecuados para usos estructurales. Estos resultados fueron similares a lo determinado por Winck et al. (2025 en edición), en el que se evaluó la totalidad de las piezas con técnicas no destructivas, donde el taxón F₂ arrojó mayores valores de densidad (medida con el Metriguard) y módulo de elasticidad dinámico (determinado por resonancia y vibración), seguidos de PT y PE y menores valores de estas propiedades para el PCH. Sin embargo, según Winck et al. (2024), los taxones PCH, la F₁ de PEE×PCH y la retrocruza PEE×F₁ se destacaron por su mayor rendimiento en m³ y porcentual en madera de apariencia, ya que generaron mayor volumen de madera de la calidad *moulding & better* (calidad superior de la norma *Factory*) respecto a las especies puras (PE y PT), estos resultados permiten definir el uso final más adecuado para cada material genético.

En el Cuadro 1 se presenta la comparación de medias entre taxones para los parámetros MOE_e, MOR y densidad estacionada y el CH para la muestra analizada con ensayos destructivos.

Cuadro 1. Propiedades físicas y mecánicas para 7 taxones de pinos.

Trat.	Taxones	Contenido de humedad (%)	Ensayos Destructivos								
			MOE _e (GPa)			MOR (N/mm ²)			Densidad estacionada (kg/m ³)		
			n	Medias	E.E.	n	Medias	E.E.	n	Medias	E.E.
1	PT	10,8	25	15,32 a	0,67	25	63,46 a	3,03	25	546 a	13,67
2	PEE	11,2	25	15,22 a	0,67	25	64,18 a	3,03	25	552 a	13,67
3	PCH	10,5	25	12,79 b	0,71	25	59,09 a	3,24	25	513 b	14,62
4	F ₁	11,4	25	13,22 b	0,65	25	59,45 a	2,97	25	520 b	13,40
5	F ₂	11,6	25	15,18 a	0,68	25	63,74 a	3,09	25	567 a	13,97
6	F ₁ ×PCH	10,9	25	12,78 b	0,65	25	58,63 a	2,97	25	507 b	13,40
7	PEE×F ₁	11,6	25	13,18 b	0,67	25	63,98 a	3,03	25	544 a	13,67

Nota: MOE_e: módulo de elasticidad estático, MOR: módulo de rotura, n: cantidad de piezas evaluadas, E.E.: error estándar. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Los valores medios de MOE_e, MOR y densidad estacionada en las tablas fueron superiores a 12 GPa, 58 N/mm² y 507 kg/m³, respectivamente, destacándose en MOE_e y densidad estacionada los taxones PT, PE y F₂. En materiales genéticos F₁, F₂ y PEE×PCH de menores edades al de este estudio, se obtuvieron menores valores para estas mismas propiedades. Por ejemplo, Pereyra et al. (2007), informaron valores medios de densidad estacionada de 514 kg/m³ para pino híbrido F₂ entre 8 y 14 años, y, Winck (2023) para pino híbrido F₁ de 11 años, indicó valores medios de MOE_e, MOR y densidad estacionada de 9,2 GPa, 38,2 N/mm² y 446 kg/m³, respectivamente. También, Bailleres et al. (2019), para el pino híbrido F₁ australiano de 11 años de edad informaron un valor medio de 9,8 GPa analizando muestras radiales del fuste a través de una metodología basada en ultrasonido. En parcelas experimentales de Sudáfrica, Wessels et al. (2011), reportaron para el pino híbrido F₁ de 9 y 11 años, valores de MOE_e de 4 GPa, MOE dinámico de 5,1 GPa y MOR de 24,9 N/mm². En el presente estudio los valores de estas propiedades son más elevados y puede atribuirse al sitio y principalmente a la edad de los materiales genéticos, por tratarse de madera madura. Es importante destacar, que todos los taxones arrojaron valores medios de propiedades que superan a los establecidos para la clase 1 de resistencia estructural para pinos resinosos según la norma argentina, cuyos valores son 12 GPa, 18 N/mm² y 420 kg/m³ para el módulo de elasticidad, módulo de rotura y densidad, respectivamente (IRAM 9662-3, 2015).

En la Ecuación 1 y Gráfico 1a se presenta el modelo de regresión lineal para predecir el MOE_e a partir del MOE_v, $MOE_e = 2,76 + 0,97 * MOE_v$ (Ecuación 1) el valor de R² ajustado fue de 79 %. En el Gráfico 1b se presentan los residuos estudentizados versus predichos para el modelo ajustado, los residuales



se distribuyen de manera homogénea. Estos resultados indican que el 79 % de la variación en el módulo de elasticidad estático está explicado por la variación en el módulo de elasticidad dinámico determinado por vibración transversal y es posible recurrir a este último sin tener que someter a las piezas a ensayos destructivos para conocer su valor de rigidez real. Winck et al. (2022) lograron ajustes similares para estimar el módulo de elasticidad estático en piezas de escuadrías comerciales a partir del módulo dinámico por vibración transversal para madera lateral de pino híbrido F₁ INTA-PINDO de 11 años. Otras técnicas acústicas, como vibración longitudinal utilizando el equipo *Portable Lumber Grader* (PLG) y onda de impacto utilizando el equipo *Microsecond Timer* de Fakopp® permitieron alcanzar una buena predicción del módulo de elasticidad estático ($R^2 > 85$) para especies de *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (Quagliotti et al. 2019; Fank et al. 2017).

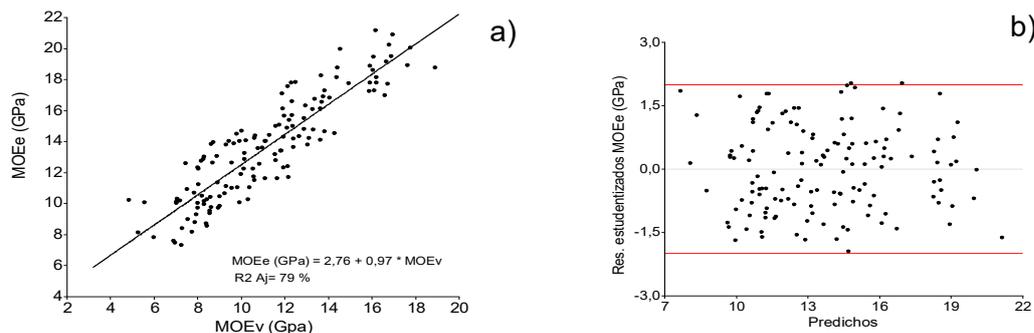


Gráfico 1. a) MOE_e versus MOE_v. **b)** Residuos estudentizados para el MOE_e estimado por vibración.

Los valores de módulo de elasticidad a la flexión estática fueron mayores a los obtenidos por el método de vibración transversal, resultados equivalente fueron obtenidos por França et al. (2018a, 2018b) y Winck (2023), quienes indicaron menores valores promedios mediante la técnica de vibración transversal para piezas de escuadrías comerciales. Estos resultados demuestran que se pueden emplear las técnicas no destructivas para realizar la clasificación mecánica de las piezas, principalmente para la madera lateral, independientemente de la especie, coincidente con lo expresado por otros autores (por ejemplo, França et al., 2018a; 2018b; 2019; 2020; Winck, 2023). Las evaluaciones acústicas se están consolidando como una técnica muy prometedora para la caracterización mecánica de la madera. La adopción de estas tecnologías de clasificación no destructiva es un paso estratégico para que la industria maderera del noreste argentino pueda competir en el mercado de la construcción, que permitiría agregar valor a su producción y garantizar la evaluación de la madera y que la materia prima que sea destinada a fines estructurales cumpla con las exigencias establecidas.

4. CONCLUSIONES

Los taxones *Pinus taeda*, *Pinus elliottii* y el pino híbrido F₂ (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*) exhibieron valores significativamente superiores en densidad estacionada y módulo de elasticidad a la flexión estática respecto a los demás taxones. Adicionalmente, estos mismos taxones mostraron una tendencia de mayores valores de módulo de rotura, aunque estas diferencias no fueron estadísticamente significativas.

Los valores medios de densidad estacionada, de módulo de elasticidad y de rotura a la flexión estática para todos los taxones superaron los estándares mínimos de la calidad 1 exigidos por la norma IRAM para clase 1 de uso estructural.

Se puede utilizar el método de vibración transversal para predecir el módulo de elasticidad a la flexión estática con un grado de precisión aceptable.

Se recomienda continuar con la investigación, especialmente referidas a las condiciones específicas de crecimiento y manejo silvícola de la región, con materiales genéticos de los taxones actualmente comercializados en el país, ya que los evaluados en este ensayo han sido superados por avances en el mejoramiento genético local o por la adaptación y desarrollo de híbridos australianos.



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.
- DI RIENZO J.A., GUZMÁN A.W., CASANOVES F. 2002. A multiple-comparisons method based on the distribution of the root node distance of a binary tree. *J Agric Biol Environ Stat.*;7(2).129–42.
- 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.
- FANK P.Y., 2018. Caracterización físico-mecánica del pino resinoso (*Pinus taeda* y *Pinus elliotti*) 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 elliotti* y *Pinus taeda*) cultivado en el nordeste de Argentina.
- 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.
- 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., SEALE R.D., SHMULSKY R., FRANÇA T.S.F.A. 2019. Assessing southern pine 2 4 and 2 6 lumber quality: longitudinal and transverse vibration. *Wood Fiber Sci.* 51(1):1-14.
- 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.
- IRAM 9662-3. 2015. Madera laminada encolada estructural. Clasificación visual de las tablas por resistencia. Parte 3: Tablas de pino taeda y elliotti (*Pinus taeda* y *elliottii*). Inst argentino Norm y Certificación, Buenos Aires. 1–15.
- IRAM 9663. 2013. Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, Buenos Aires.
- PEREYRA O., SUIREZS M.T., BOBADILLA E.A., REDKA L, KAHLSTORF E. 2007. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la Madera del híbrido *Pinus elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* y su comportamiento en la elaboración de productos remanufacturados. Proyecto UNAM. Código ISIF: II – 15. Código Incentivo: 16/F064.
- 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.
- WESSELS C.B., DOWSE G.P., SMIT H.C. 2011. The flexural properties of young *Pinus elliottii* x *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. 2023. Calidad estructural de la madera de pino híbrido F₁ *Pinus elliottii* var. *elliottii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* basada en métodos no destructivos. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales. Universidad Nacional de Misiones. Pp. 222. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/14834>.
- WINCK R.A., AQUINO D.R., BELABER E.C., FASSOLA H.E., BULMAN HARTKOPF C., GOMEZ, B.J., BRAGAÑOLO A. 2025 (en edición). Caracterización mecánica de 7 taxones de pino mediante técnicas acústicas. Enviado a 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., BELABER, E.C., AQUINO, D.R., BULMAN HARTKOPF, C., ROTUNDO, C.A., GAUCHAT, M.E., FASSOLA, H. E. 2024. Rendimiento en el aserrado por grados de calidad para apariencia y remanufactura en taxones de pinos en el Noreste de Argentina. *Revista Forestal Yvyretá* 32. Pp. 13.



EJECUCIÓN DE INVENTARIOS FORESTALES EN EL DELTA DEL PARANÁ USANDO TECNOLOGÍA LiDAR

Cristhian CARAZZO¹; Eduardo HILDT²

RESUMEN

La tecnología LiDAR se ha consolidado como una herramienta esencial para inventarios forestales, especialmente en áreas de difícil acceso. El objetivo de este estudio fue estimar variables dasométricas a nivel de rodal en plantaciones de salicáceas y eucaliptos del Delta del Paraná. Se utilizó información LiDAR aerotransportada con una densidad promedio de 9 puntos/m², complementada con parcelas circulares de 500 m², georreferenciadas con error horizontal menor a 3 m. La nube de puntos LiDAR fue procesada considerando la variabilidad de las métricas para la planificación del relevamiento de parcelas de ajuste. Se extrajeron métricas de altura de cada parcela y se seleccionaron aquellas con mayor capacidad predictiva para ajustar modelos por variable y especie. Los resultados demostraron un desempeño satisfactorio en comparación con inventarios previos, confirmando el potencial del método para futuros inventarios forestales en estas especies.

Palabras clave: *Relevamiento aéreo, ALS, GIS, existencias forestales.*

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología LiDAR (Light Detection And Ranging) constituye una forma de teledetección basada en sensores activos que emplea pulsos de luz láser para medir distancias con alta precisión y generar modelos tridimensionales detallados del terreno y la vegetación (Hyypä et al., 2008). Su funcionamiento se basa en la emisión de pulsos de luz láser y la medición del tiempo de retorno al sensor, lo que permite determinar con exactitud la distancia a diferentes puntos de la superficie terrestre.

Una característica distintiva de la captura de información LiDAR es la capacidad de cada haz láser para generar múltiples retornos, a medida que diferentes porciones del haz interactúan con diversos objetos presentes en la escena. El producto final consiste en una nube de puntos tridimensional que describe las elevaciones del terreno y de todos los elementos presentes en el área estudiada. A partir del análisis del perfil de distribución vertical de la nube de puntos, es posible calcular diversos indicadores estadísticos que presentan correlaciones significativas con las variables dasométricas de interés forestal (Andersen et al., 2005).

Los relevamientos LiDAR experimentan una adopción creciente como herramienta de apoyo a los inventarios forestales tradicionales, debido a sus ventajas: costo-efectividad en grandes superficies, versatilidad y rapidez en la captura de información, precisión adecuada de las estimaciones a nivel de masa forestal, y la generación de múltiples subproductos de alto valor como los Modelos Digitales de Terreno y los ortomosaicos fotográficos generados durante los relevamientos (Sastre et al., 2016; Tomé et al., 2013). Estudios recientes han demostrado la eficacia del enfoque basado en áreas (*area-based approach*) para estimaciones a nivel de rodal, mostrando resultados comparables a métodos tradicionales de inventario forestal (Frank et al., 2020). En Argentina, las 1.189.558 hectáreas de bosques implantados con Pinos, Eucaliptos, Sauces y Álamos representan un potencial significativo para la aplicación de esta tecnología (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2025).

¹ Ingeniero Forestal Arauco Argentina. cristhian.carazzo@arauco.com

² Dr. Ingeniero Forestal INTA EEA Montecarlo. hildt.eduardo@inta.gob.ar



El objetivo del presente trabajo es presentar una experiencia de ajuste de modelos para la estimación de las variables dasométricas en bosques de salicáceas y eucaliptos implantados en el Delta del Paraná, empleando tecnología LiDAR como herramienta principal de análisis.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El inventario forestal se desarrolló en el Delta del Paraná, una extensa planicie de inundación caracterizada por un relieve cóncavo y un complejo sistema hidrográfico. La región presenta islas delimitadas por albardones elevados, mientras que sus centros corresponden a depresiones topográficas cubiertas principalmente por pajonales. Esta región se caracteriza por forestación predominante de salicáceas, principalmente sauces (*Salix spp.*) y álamos (*Populus spp.*), y en menor proporción eucaliptos (*Eucalyptus spp.*) (Cozzo, 1995).

El área de inventario comprende dos establecimientos forestales: el predio Milagros (partido de Zárate, Buenos Aires) y el predio Isla Victoria (Villa Paranacito, Entre Ríos), abarcando una superficie total de 10.156 hectáreas.

Adquisición de datos LiDAR

El relevamiento LiDAR aerotransportado se diseñó para generar una nube de puntos con densidad promedio de 9 puntos/m². Se utilizó un sistema LiDAR Leica ALS80 integrado con una cámara fotogramétrica RCD30, montados en una aeronave Cessna C206H. Los parámetros de vuelo fueron: altura de 1.000 m AGL, velocidad de crucero de 95 nudos y solapamiento lateral del 60 %.

Procesamiento de la nube de puntos

Una vez recibida la nube LiDAR, se realizó un filtrado de puntos con valores atípicos de elevación utilizando el criterio de ± 3 desvíos estándar respecto de la media de un grupo de puntos vecinos. Posteriormente, se modeló el nivel del terreno empleando la función *GroundFilter* del software FUSION (McGaughey, 2016). Finalmente, se normalizó la nube de puntos restando a cada punto el valor de elevación estimado del modelo digital del terreno, obteniendo alturas relativas al nivel del suelo.

Parcelas de ajuste

Se establecieron parcelas circulares de 500 m² con centros georreferenciados mediante receptores GNSS. En cada parcela se midieron los diámetros de todos los árboles y la altura de 7 árboles representativos, incluyendo aquellos con DAP máximo y mínimo.

La distribución de parcelas buscó captar la variabilidad necesaria para el ajuste de modelos. Se estratificaron los rodales agrupando superficies por especies con forma de copa similar, planificando el muestreo utilizando la altura máxima extraída desde las métricas LiDAR como referencia para incluir toda la variabilidad existente dentro de cada estrato (Prodan, 1997) (Figura 1).

Cálculo de las métricas LiDAR

Las métricas descriptoras de la nube de puntos se calcularon empleando los comandos *Cloudmetrics* y *Gridmetrics* del software FUSION (McGaughey, 2016). Se calcularon para cada parcela de ajuste (radio 12,6 m) y para toda la extensión del relevamiento considerando celdas de 20 × 20 m (400 m²). Se calcularon 111 métricas, incluyendo altura máxima, altura media, percentiles de altura, desviación estándar y asimetría. Algunas métricas como la diferencia entre el percentil 95 y el percentil 5 (p95-p05) derivan de las anteriores.

Selección de métricas y ajuste de modelos

Del conjunto total de métricas calculadas, se seleccionaron aquellas con mejor correlación con las variables dasométricas mediante el método de eliminación *backward* aplicado a regresión no lineal. Las mejores variables predictoras resultaron ser la desviación estándar de la altura (std) y la diferencia entre percentil 95 y percentil 5 (p95-p05).



Figura 1. Ejemplo de distribución de las parcelas en uno de los predios.

Se modeló la relación entre seis variables dasométricas y las métricas principales evaluando el modelo de Chapman-Richards y una variante incorporando la desviación estándar de la altura. Este tipo de modelo fue elegido por representar adecuadamente el comportamiento de los datos, con asíntota en valores máximos que evita estimaciones aberrantes al extrapolar (Prodan, 1997). En el Cuadro 1 se muestran los modelos ajustados.

Cuadro 1. Modelos ajustados para las diferentes variables dasométricas.

	Modelo Usado
Volumen Total (m ³ cc/ha):	$b_0 * (1 - \text{EXP}(-b_1 * p_{95-p05}))^{b_2} * (1 - \text{EXP}(-b_3 * \text{std}))^{b_4}$
Altura dominante (m):	$b_0 * (1 - \text{EXP}(-b_1 * p_{95-p05}))^{b_2}$
Altura media (m):	$b_0 * (1 - \text{EXP}(-b_1 * p_{95-p05}))^{b_2}$
NPL (plantas/ha):	$b_0 * (1 - \text{EXP}(-b_1 * p_{95-p05}))^{b_2}$
Área Basal (m ² /ha):	$b_0 * (1 - \text{EXP}(-b_1 * p_{95-p05}))^{b_2} * (1 - \text{EXP}(-b_3 * \text{std}))^{b_4}$
DAP (cm):	$b_0 * (1 - \text{EXP}(-b_1 * p_{95-p05}))^{b_2} * (1 - \text{EXP}(-b_3 * \text{std}))^{b_4}$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales indicadores de ajuste para los modelos estimados se presentan en el Cuadro 2. Los coeficientes de determinación (R²) variaron entre 0,87 y 0,97, indicando un buen ajuste de los modelos a los datos observados.

Cuadro 2. Parámetros de los modelos ajustados para las diferentes variables dasométricas.

	Estratos	SABA	SANI	PODE	EUDE
Volumen Total (m ³ cc/ha):	Error estándar, Sxy:	44,7	25,0	36,2	46,7
	r ²	0,88	0,91	0,93	0,97
Altura dominante (m):	Error estándar, Sxy:		1,68		
	r ²		0,92		
Altura media(m):	Error estándar, Sxy:		1,84		
	r ²		0,92		
NPL (plantas/ha):	Error estándar, Sxy:		342,0		
	r ²		0,87		
Área Basal (m ² /ha):	Error estándar, Sxy:		3,55		
	r ²		0,91		
DAP (cm):	Error estándar, Sxy:		1,88		
	r ²		0,91		



Los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos en Argentina que reportan la efectividad de la tecnología LiDAR para estimación de variables forestales (Tomé et al., 2013). La variable altura mostró las mejores correlaciones, mientras que el número de árboles por hectárea presentó mayor variabilidad, patrón similar al reportado por Tomé et al. (2013) en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en Corrientes. Los valores de R^2 obtenidos (0,87-0,97) están dentro del rango reportado en la literatura reciente para estudios similares (Dalla Corte et al., 2022).

En la Figura 2 se muestra la comparación entre los valores observados a campo y los valores predichos por el modelo ajustado para el Volumen, para los distintos estratos definidos: *Salix nigra* (SANI), *Salix babylonica* (SABA), *Populus deltoides* (PODE), *Eucalyptus spp* (EUDE).

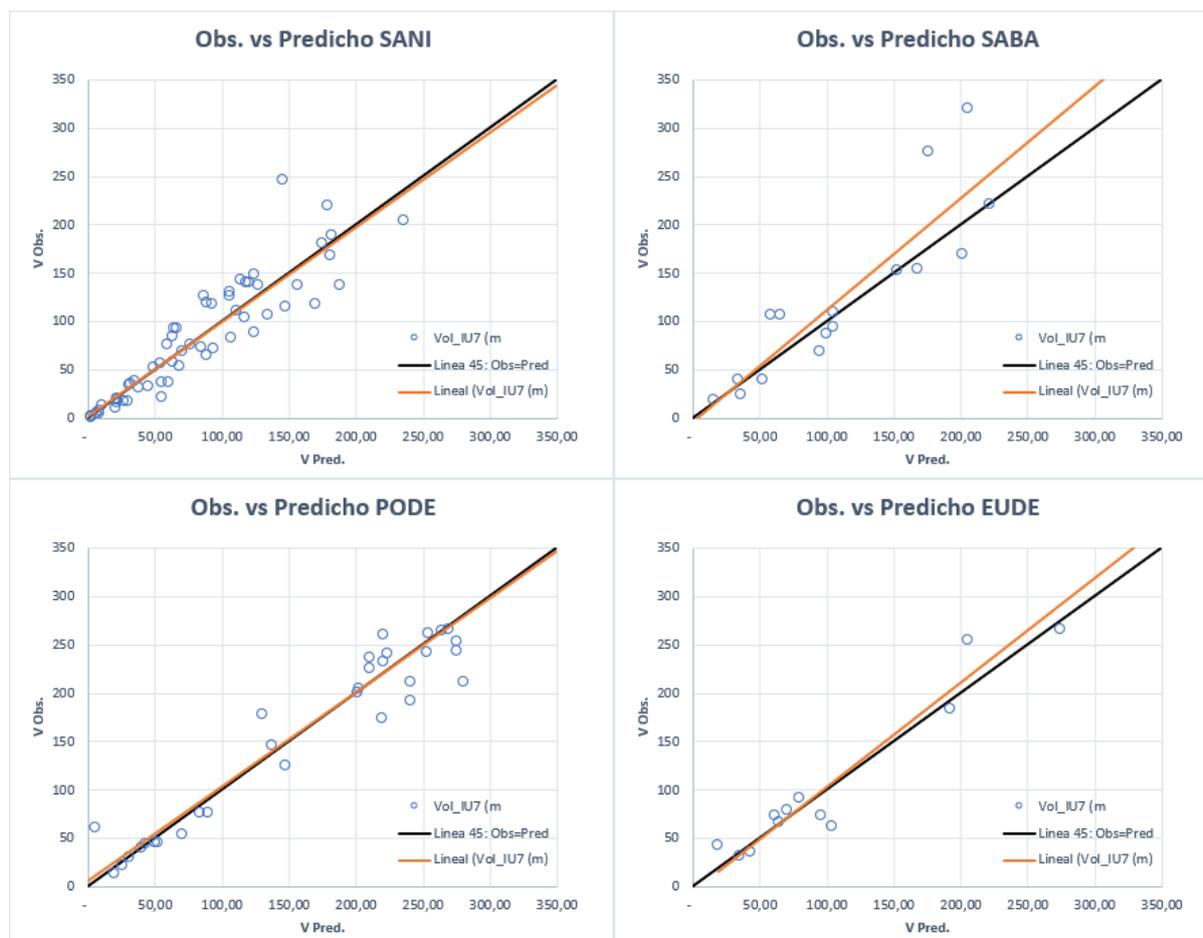


Figura 2. Comparación entre los valores observados y los valores predichos por el modelo.

El producto cartográfico generado muestra la distribución espacial de las variables estimadas con resolución de 20×20 m, permitiendo observar la variación del volumen total en el terreno según el sitio, altimetría y existencia de drenajes (Figura 3). Esta información resulta fundamental para la toma de decisiones silviculturales y de manejo a nivel de rodal, y es consistente con las tendencias actuales hacia la silvicultura de precisión basada en datos espaciales de alta resolución.

4. CONCLUSIONES

La tecnología LiDAR presentó buenos resultados en la estimación de variables dasométricas en el área de estudio. Se logró ajustar modelos estadísticamente satisfactorios para estimar volumen total, altura, área basal y densidad arbórea, con indicadores de ajuste aceptables ($R^2 > 0,87$).

El trabajo demostró la importancia de una correcta estratificación de la superficie y un proceso de muestreo adecuado para obtener ajustes estadísticamente robustos entre variables dasométricas y métricas LiDAR. La metodología permite mostrar la variabilidad a nivel de rodal mediante resultados en grilla, información útil para acciones de manejo orientadas a homogenizar y aumentar la productividad.



Las ventajas adicionales incluyen la obtención de subproductos como modelos digitales de terreno y fotografías aéreas, de gran utilidad para planificación de drenajes, optimización de caminos y determinación de zonas de cosecha especial.

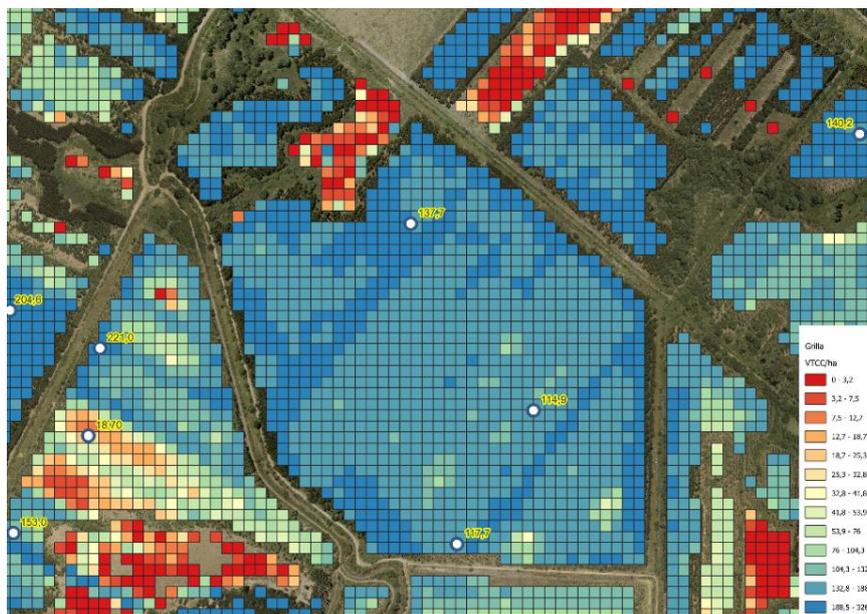


Figura 3. Grilla de resultados de la variable volumen total en rodales de salicáceas

5. LITERATURA CITADA

- ANDERSEN, H.E.; MCGAUGHEY, R.J.; REUTEBUCH, S.E. 2005. Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment* 94:441-449.
- COZZO, D. 1995. *Silvicultura de plantaciones maderables*. Orientación Gráfica Editora S.R.L., Buenos Aires, 905p.
- DALLA CORTE, A.P.; BROADBENT, E.N.; de OLIVEIRA SANTOS, L. H.; et al. 2022. Aplicações do lidar para o inventário florestal – enfoque unidade de área. Atena Editora. DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.223222904>
- HYYPÄ, J.; HYYPÄ, H.; LECKIE, D.; GOUGEON, F.; YU, X.; MALTAMO, M. 2008. Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29(5):1339-1366.
- MCGAUGHEY, R.J. 2016. FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, University of Washington.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA. 2025. Tablero de plantaciones forestales. Recuperado el 24 de agosto del 2025, de <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-forestal-industrial/inventarios/tablero.php>
- PRODAN, M. 1997. *Mensura forestal*. Agroamérica, Serie Técnica N.º 1.
- SASTRE, L.F.S.; MARCOS-ROBLES, J.L.; LLORENTE, E.H.; NAVARRO, S.H.; PRIETO, P.C. 2016. Aplicación de tecnologías de teledetección al estudio de biomasa forestal. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação* 19:61.
- TOMÉ, J.L.; NOJEK, S.; PINTO, L.; RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ, A. 2013. Aplicación de la tecnología LiDAR aerotransportada a la evaluación del carbono fijado en plantaciones forestales de *Eucalyptus grandis* en la provincia de Corrientes, República Argentina. XXVII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia, octubre de 2013.
- FRANK, B.; MAURO, F.; TEMESGEN, H. 2020. Model-Based Estimation of Forest Inventory Attributes Using Lidar: A Comparison of the Area-Based and Semi-Individual Tree Crown Approaches. *Remote Sensing* 12(16):2525.



¿QUE NOS PUEDEN DECIR LOS DATOS DEL SEGUNDO INVENTARIO NACIONAL DE BOSQUES NATIVOS SOBRE LOS BOSQUES MADERABLES DEL ESTE DE FORMOSA?

Pablo VELAZCO¹; Andriy BAZYLENKO²; Víctor PÉREZ³

RESUMEN

La degradación de los bosques nativos a escala global es impulsada principalmente por actividades antrópicas como la tala y la ganadería. El objetivo de este trabajo fue clasificar a los bosques maderables del Chaco Húmedo de Formosa según sus atributos estructurales y de riqueza, y evaluar su relación con actividades antrópicas circundantes. A partir de datos del Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos se extrajo información sobre el área basal, densidad, abundancia de renovales, riqueza y altura media para los tipos forestales Bosque Alto (Ba) y Bosque Bajo (Bb) y se realizó una clasificación mediante el método de k-means. Para cada clase obtenida se evaluaron los tipos de actividades antrópicas más frecuentes. Los resultados permitieron identificar dos clases tanto para los Ba como para los Bb. Para ambos tipos forestales, el grupo que presentó mayores valores en su riqueza y atributos estructurales se asoció a sitios sin intervención o con tala, mientras que el grupo de menor valor se encontró con mayor frecuencia vinculado a sitios con ganadería y/o tala. Estos patrones destacan la necesidad de considerar tanto el tipo forestal como la actividad productiva al definir estrategias de conservación, restauración y uso sustentable de los recursos forestales.

Palabras clave: *riqueza, estructura, ganadería, tala, Chaco Húmedo*

1. INTRODUCCIÓN

Una creciente presión de diversos factores relacionados con el cambio global está contribuyendo a la pérdida y degradación forestal, lo que produce tanto una alteración de las propiedades de estos ecosistemas como su capacidad para brindar servicios ecosistémicos esenciales (FAO, 2020). Según el último Inventario Nacional de Bosques Nativos, la Argentina posee aproximadamente 50 millones de hectáreas, distribuidas en diversas regiones. Entre ellas, el Parque Chaqueño se destaca por su vasta extensión y biodiversidad concentrando cerca del 60 % de los bosques nativos del país (UMSEF, 2022). Cada año extensas áreas de bosque son transformadas, y gran parte de los remanentes se encuentran degradados y/o fragmentados por actividades antrópicas tales como la tala selectiva, la ganadería extensiva y el avance de la frontera agropecuaria (Cuadra, 2018; Grau et al., 2005; Nanni et al., 2020; Torrella et al., 2015; Zarrilli, 2004, 2016).

Actualmente, la provincia de Formosa ocupa el tercer lugar en proporción de bosques nativos de la región, conservando aproximadamente 2,24 millones de hectáreas (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). La Ley Provincial de Ordenamiento Territorial (N° 1.660) clasifica a este ecosistema en tres categorías principales -Bosque Bajo (Bb), Bosque Alto (Ba) y Bosques de Ribera (Br)- en función de sus atributos estructurales y de composición de especies. Desde una perspectiva silvícola, las formaciones Ba y Bb revisten especial importancia por su potencial maderable, siendo históricamente claves para la economía regional. Como consecuencia, estas formaciones han sido transformadas e intensamente aprovechadas dada la diversidad y características de sus especies

¹ Centro de Ecología y Biodiversidad del Chaco Argentino, Facultad de Recursos Naturales, Universidad Nacional de Formosa. Contacto: pablojvelazco@gmail.com

² Grupo de Estudio en Sistemas Ecológicos en Ambientes Agrícolas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Contacto: abazylenko@ege.fcen.uba.ar

³ Laboratorio de Silvicultura, Facultad de Recursos Naturales, Universidad Nacional de Formosa. Contacto: victorforestal8@gmail.com



maderables (Ministerio de Asuntos Agropecuarios y Recursos Naturales, 1978; Tortorelli, 2009).

En este contexto, el presente estudio busca clasificar los bosques maderables del Chaco Húmedo de Formosa en función de sus atributos estructurales y de riqueza, así como evaluar su relación con las actividades antrópicas, con el fin de aportar un panorama general del estado actual del recurso forestal en la región.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio (Figura 2) se localiza en el este de la provincia de Formosa, abarcando el sector norte del Complejo Ecosistémico Oriental del Bajo Paraguay, dentro de la ecorregión del Chaco Húmedo (Morello et al., 2012). La región presenta un clima subtropical húmedo, con una temperatura media anual de 22 °C y precipitaciones anuales que oscilan entre 1100 y 1400 mm con una marcada concentración estival. El paisaje se caracteriza por riachos que discurren en sentido NO-SE en cuyos albardones se encuentran bosques marginales, mientras que en los interfluvios encontramos humedales, sabanas de palma y bosques aislados (Morello et al., 2012).

Base de datos

La base de datos sobre los bosques maderables del área de estudio se obtuvo a partir de una selección de las parcelas del Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos (SINBN) (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, 2019). Esta selección se realizó a través de las características de composición y abundancia de especies correspondientes a los tipos forestales Bosque Alto (Ba) y Bosque bajo (Bb) del Inventario Provincial de Bosques Nativos de Formosa (Ministerio de Asuntos Agropecuarios y Recursos Naturales, 1978). Para ello, se aplicó una regla condicional a cada parcela de inventario con los siguientes criterios: (1) Bosque alto: hay al menos 2 especies principales del tipo Ba; no hay regeneración ($\leq 12,5$ cm) de especies intermedias o heliófilas, y al menos 1 individuo con DAP > 20 cm. (2) Bosque Bajo: hay al menos 2 especies principales del tipo Bb; no hay regeneración ($\leq 12,5$ cm) de especies heliófilas propias de bosques en formación o colonizadoras; pocos individuos de palma blanca (≤ 5), y al menos 1 individuo con DAP > 20 cm. A partir de la base de datos se cuantificó, para cada parcela, la densidad, área basal, altura media y riqueza de especies maderables y totales, así como también la abundancia de renovales total.

Determinación de clases

Para clasificar las parcelas de Ba y Bb en grupos relativamente homogéneos en función de sus atributos estructurales y de riqueza, se realizó un análisis de agrupamiento no supervisado mediante el método k-means (Sinaga y Yang, 2020). Este método busca optimizar la homogeneidad dentro de cada grupo minimizando la varianza intra-cluster, sin establecer relaciones jerárquicas entre los grupos (Sinaga y Yang, 2020). Los valores de cada variable se estandarizaron, y se construyó una matriz de distancias euclidianas entre las parcelas de inventario. La cantidad de clases (k) fue determinada mediante el método silhouette (Rousseeuw, 1987). Este método evalúa, para cada observación, la diferencia entre su cohesión intracluster (cohesión) y su separación respecto al cluster más cercano (separación), seleccionando el valor de k que maximiza el promedio del ancho de silueta. Las clases obtenidas fueron descritas mediante la media y el desvío de las variables estructurales para las especies maderables y totales.

Para obtener la proporción de parcelas de cada clase asociadas a las distintas actividades antrópicas, se utilizaron datos anexos al SINBN sobre presencia de tocones y ganadería. Cada parcela fue clasificada según cuatro categorías de antropización: (1) sin intervención (parcelas sin evidencia de tala ni actividad ganadera); (2) tala (presencia de tocones sin ganadería asociada); (3) ganadería (donde se registró actividad ganadera sin evidencia de tala); y (4) parcelas con tala y ganadería. Además, cada una de las variables de estructura y la riqueza se compararon entre sitios asociados a distintos usos antrópicos mediante el test de Kruskal-Wallis. En caso de encontrarse diferencias significativas se realizaron contrastes de Dunn corregido por Bonferroni con una confianza del 95 %. Todos los análisis se llevaron a cabo utilizando el software R 4.5.0 (R Core Team, 2025).



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 166 parcelas del Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos ubicadas en el área de estudio, el 27,7% correspondieron a Bosque Alto (Ba) y Bosque Bajo (Bb) con 23 parcelas para cada tipo forestal. El análisis de agrupamiento permitió identificar dos clases estructurales tanto para Ba como para el Bb. En general, las parcelas de la Clase I presentaron mayores valores medios de sus atributos estructurales y en la riqueza de especies en comparación a las parcelas de la Clase II, con excepción de la altura de especies maderables y la riqueza total en Ba (Figura 1).

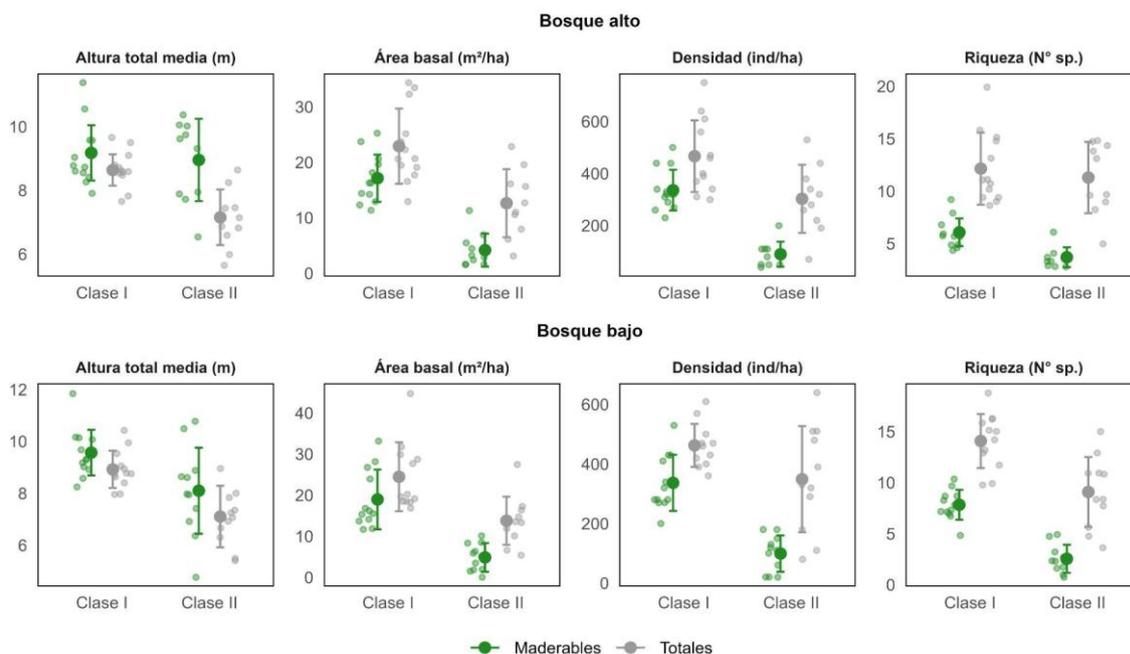


Figura 1. Comparación de atributos estructurales (altura total, área basal, densidad) y riqueza de especies entre parcelas de Bosque Alto (Ba) y Bosque Bajo (Bb). Las barras y puntos verdes representan las medias \pm desvío estándar para especies maderables, mientras que los elementos grises corresponden a todas las especies.

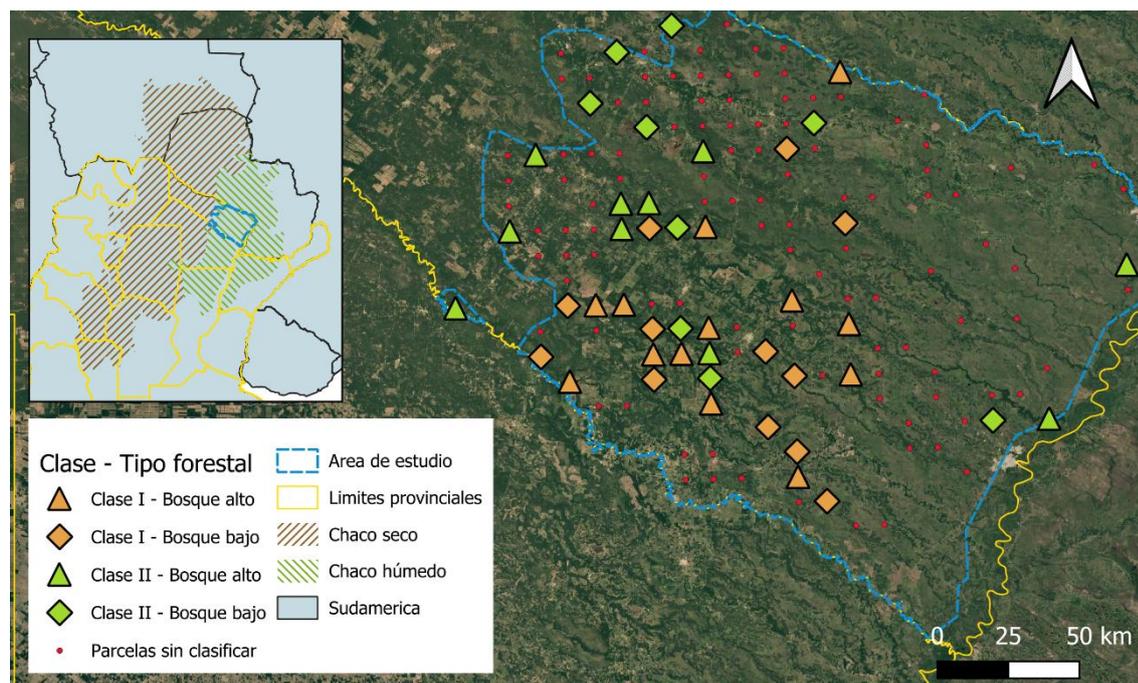


Figura 2. Distribución de las clases de estructura y riqueza dentro del área de estudio.



Si bien ninguna de las dos clases se encontró exclusivamente en algún sector particular del área de estudio, se observó una mayor cantidad de parcelas de la clase I en el sector central y de la clase II en los extremos noroeste y este (Figura 2).

En las parcelas de Bosque Alto (Ba), el 70 % de las unidades clasificadas en las clases I y II se localizaron en sitios con evidencias de antropización. Para la clase I, la actividad antrópica más frecuente fue la tala (38,5 %), mientras que en la clase II predominó la combinación de tala y ganadería (40 %). Por su parte, en las parcelas de Bosque Bajo (Bb), la clase I presentó un patrón similar al de los Ba, mientras que la clase II tuvo mayoritariamente parcelas asociadas a la ganadería (81,5 %) (Figura 3).

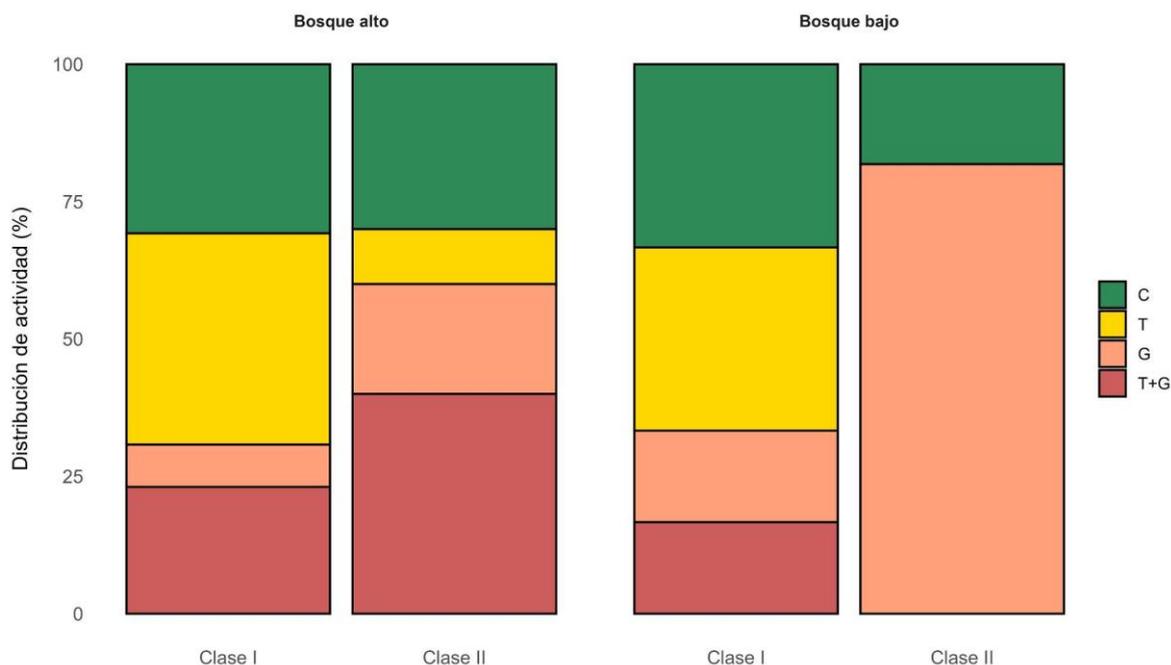


Figura 3. Distribución porcentual de actividades antrópicas en bosques del Chaco Húmedo de Formosa, clasificadas por tipo forestal (Bosque Alto y Bosque Bajo) y clase de estructura y riqueza (Clase I y II). Categoría de antropización: C: Ausencia de tala y ganadería; T: Presencia de tocones sin ganadería; G: Actividad ganadera sin tala asociada; T+G: Presencia de tala y ganadería.

Se encontraron diferencias significativas entre las categorías de antropización para algunas variables estructurales del bosque, específicamente para altura total, altura maderable, densidad maderable, área basal maderable y riqueza maderable ($p < 0,05$). El análisis post-hoc con ajuste de Bonferroni mostró que los sitios sin intervención (C) y los intervenidos por tala (T) presentaron valores significativamente mayores en altura total respecto a los sitios con ganadería (G) ($p = 0,02$ y $p < 0,01$, respectivamente), mientras que en altura maderable los sitios sin intervención fueron mayores que los ganaderos ($p = 0,02$). La densidad y el área basal maderable también fueron significativamente mayores en C y T comparados con G ($p = 0,01$ y $p < 0,01$). Finalmente, la riqueza maderable fue mayor en T respecto a G ($p < 0,01$) así como también respecto a los sitios con tala y ganadería combinadas (T+G) ($p = 0,03$). Los resultados muestran que los sitios con ganadería presentan valores de riqueza y estructura menores en relación con los otros manejos. Esto podría explicarse o bien por el hecho de que esta actividad tiene un efecto negativo sobre las variables estructurales del componente maderable o bien porque los bosques donde se realiza ganadería presentan características de menor calidad en estos atributos siendo no aptos para el desarrollo de la actividad forestal.

4. CONCLUSIONES

La metodología empleada permitió diferenciar dos clases estructurales para los tipos forestales Bosque Alto (Ba) y Bosque Bajo (Bb). Esto permitió poner en evidencia que a escala regional encontramos una



gran proporción de bosques empobrecidos en sus atributos estructurales y en su riqueza. Estos bosques se encuentran frecuentemente en sitios asociados a actividad ganadera y/o maderera. Estos resultados evidencian la necesidad de considerar tanto el tipo forestal como la actividad productiva al definir estrategias de conservación, restauración y uso sustentable de los recursos forestales en un contexto regional. Asumiendo que los datos proporcionados por el inventario son limitados, este estudio provee una base objetiva para definir zonas prioritarias de conservación y estrategias diferenciadas de manejo para los bosques nativos de Formosa.

5. LITERATURA CITADA

- CUADRA, D.E. 2018. La explotación foresto industrial en el Chaco.
- FAO (Ed.). 2020. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/ca9825es>
- GRAU, H.R.; GASPARRI, N.I.; AIDE, T.M. 2005. Agriculture expansion and deforestation in seasonally dry forests of north-west Argentina. *Environmental Conservation*, 32(2), 140-148. <https://doi.org/10.1017/S0376892905002092>
- MINISTERIO DE ASUNTOS AGROPECUARIOS Y RECURSOS NATURALES. 1978. Inventario Forestal de la Provincia de Formosa: Zona «A».
- MORELLO, J.; MATTEUCCI, S.; RODRIGUEZ, A.; SILVA, M. 2012. Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. Buenos Aires. 752 p.
- NANNI, A. S.; PIQUER RODRÍGUEZ, M.; RODRÍGUEZ, D.; NUÑEZ REGUEIRO, M.; PERIAGO, M. E.; AGUIAR, S.; BALLARI, S.; BLUNDO, C.; DERLINDATI, E.; DI BLANCO, Y.; ELJALL, A.; GRAU, H. R.; HERRERA, L.; HUERTAS HERRERA, A.; IZQUIERDO, A. E.; LESCANO, J. N.; MACCHI, L.; MAZZINI, F.; MILKOVIC, M.; GASPARRI, N. I. 2020. Presiones sobre la conservación asociadas al uso de la tierra en las ecorregiones terrestres de la argentina. *Ecología Austral* 30(2): 304-320. <https://doi.org/10.25260/EA.20.30.2.0.1056>
- R CORE TEAM. 2025. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1574231874043578752>
- ROUSSEEUW, P. J. 1987. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics* 20: 53-65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)
- SECRETARÍA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SUSTENTABLE. 2019. Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos. Manual de Campo. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/segundo-inventario-nacional-bosques-nativos>
- SINAGA, K.P.; YANG, M. S. 2020. Unsupervised K-Means Clustering Algorithm. *IEEE Access*, 8, 80716-80727. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2988796>
- TORRELLA, S. A., GINZBURG, R.; GALETTO, L. 2015. Forest fragmentation in the Argentine Chaco: Recruitment and population patterns of dominant tree species. *Plant Ecology* 216(11): 1499-1510. <https://doi.org/10.1007/s11258-015-0532-2>
- TORTORELLI, L. A. 2009. Maderas y bosques argentinos. 2a. edición. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora. 910 p.
- ZARRILLI, A. G. 2004. Historia, Ambiente y Sociedad. La explotación forestal de los bosques chaqueños argentinos (1895-1948). *Diálogos Revista Electrónica de Historia* 4(2). <https://www.redalyc.org/pdf/439/43940204.pdf>
- ZARRILLI, A.G. 2016. Transformaciones ambientales y producción agroforestal: El Gran Chaco Argentino en el siglo XX. *Historia: Debates e Tendências* 16(1):53-71. <https://doi.org/10.5335/hdtv.16n.1.6253>



CRECIMIENTO DEL GUATAMBÚ (*Balfourodendron riedelianum*, Rutaceae) CON RELACIÓN AL TAMAÑO DEL ÁRBOL Y EL CONTEXTO DE COMPETENCIA EN BOSQUES NATIVOS (MISIONES, ARGENTINA) COMO INSUMO PARA SU PROMOCIÓN FORESTAL

Natalia A. BEDRIJ¹; Patricio M. MAC DONAGH²; Ma. Genoveva GATTI^{1,2}

RESUMEN

El guatambú blanco (*Balfourodendron riedelianum* Engl., Rutaceae) es un árbol nativo del Bosque Atlántico muy apreciado por su madera. Sin embargo, poco se conoce sobre ecología, especialmente en cuanto a su desarrollo. Este estudio propone determinar la tasa de crecimiento de *B. riedelianum* y analizar su relación con el tamaño individual y con el contexto de competencia, en bosques nativos de Misiones. Se trabajó en la Reserva de Uso Múltiple Guaraní, en 18 parcelas permanentes de 1 ha, medidas entre 1998 y 2019. Se analizaron 270 individuos (10-64 cm DAP). Se utilizaron MLM para estimar el crecimiento relativo de los individuos en función de su tamaño inicial y su competencia (área basal circundante). El crecimiento relativo disminuyó al aumentar el tamaño y la competencia. Los individuos más pequeños crecieron más rápido que aquellos más grandes, y los individuos con menos competencia (más aislados) crecieron más comparados con aquellos con mayor competencia. Los resultados resaltan la importancia de priorizar el manejo efectivo de los individuos en las etapas más tempranas posibles para promover su crecimiento. Estos hallazgos son claves en el manejo forestal, pudiendo incorporar a la competencia junto al criterio del DMC para mejorar la selección de los individuos a cortar.

Palabras clave: *biodiversidad, diversificación productiva, especie nativa, manejo forestal, producción maderable.*

1. INTRODUCCIÓN

La madera proveniente de especies nativas ha sido históricamente apreciada en Argentina. Sin embargo, su oferta y comercialización, ya de por sí escasa con relación a la madera proveniente de plantaciones (ej. *Pinus* y *Eucalyptus*), se ha reducido en las últimas décadas (PNEF, 2025). Esto se explica, en parte, por la reducción del área de bosques nativos por el avance de la frontera agropecuaria, pero también debido a su degradación por la cosecha selectiva no planificada y la consecuente pérdida de calidad y productividad (Galarco y Ramilo, 2019). Estas limitantes podrían compensarse, al menos parcialmente, estableciendo plantaciones forestales con especies nativas o enriqueciendo áreas de bosque nativo bajo manejo con especies de interés. Sin embargo, a la hora de promover este tipo de iniciativas, surgen otras limitantes, entre las que se destaca la falta de información ecológica sobre las especies nativas para la toma de decisiones (Schöngart, 2008; MAyDS, 2023) como, por ejemplo, aquella relacionada a la tasa de crecimiento de las especies de interés, así como a la variabilidad natural de este rasgo entre individuos.

El guatambú blanco (*Balfourodendron riedelianum* Engl., Rutaceae) es uno de los árboles más frecuentes en los bosques nativos de Misiones y Corrientes (Argentina; MAyDS, 2023). A pesar de esto, debido a la sobreexplotación y a la pérdida de cobertura boscosa, la UICN lo categoriza como “en peligro de extinción” desde 1998 (UICN, 2025). Los árboles de esta especie pueden alcanzar un gran porte (25 a 35 m de altura y 0,4 a 0,9 m de diámetro) y presentan un fuste largo, cilíndrico y poco

¹ Instituto de Biología Subtropical (Universidad Nacional de Misiones-CONICET), Tres Fronteras 183, Puerto Iguazú, Misiones N3370BFA, Argentina. nabedrij@gmail.com; genoveva.gatti@conicet.gov.ar

² Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones, Eldorado, Misiones, Argentina. patricio.macdonagh@gmail.com



tortuoso (Ortega Torres et al., 1989). Su madera es muy apreciada, por un lado, por su estética, ya que es clara, amarillenta, con veteado y brillo suave, de textura fina y homogénea, medianamente dura ($0,82 - 0,84 \text{ kg/dm}^3$); y, por otro lado, por su gran versatilidad, ya que se la puede utilizar para muebles de calidad, tornería, láminas, pisos, mangos de herramientas y leña (Kummel, 2021; IFONA, 2004; Ortega Torres et al., 1989). Crece de manera natural en densidades variables; en áreas donde es frecuente puede superar los 25 individuos >10 DAP por hectárea. La provincia de Misiones ha sido la principal fuente de origen de esta madera, los registros nacionales indican un volumen superior a los 55.000 m^3 de madera de guatambú en rollizos durante los 80's, pasando a unos 20.000 m^3 al inicio de los 2000, para reducirse a entre 7.000 y 8.500 m^3 en los últimos años (2021- 2023), donde representó entre la cuarta y quinta especie más comercializada en la provincia (PNEF, 2025). Todo esto indica que es una especie muy apreciada pero que su oferta se ha reducido drásticamente en el tiempo.

El crecimiento del guatambú, y de los árboles en general, depende principalmente de factores ambientales e intrínsecos. En bosques (sub)tropicales, la disponibilidad de luz, agua y nutrientes es el factor ambiental principal que afecta el crecimiento. Por otro lado, las características intrínsecas de los individuos, como su grado de desarrollo (o tamaño) y su acervo genético, también influyen en esta tasa de crecimiento (Bowman et al., 2013; Yang et al., 2021). De esta manera, incluso dentro de una misma especie, la tasa de crecimiento de diferentes individuos puede ser muy variable dependiendo sus características y el sitio en el que se desarrollan.

En este contexto, surge el presente trabajo donde se analiza la tasa de crecimiento de árboles adultos de guatambú y su variabilidad entre individuos que se desarrollan de forma natural en el bosque nativo de Misiones, considerando árboles de diferentes tamaños y bajo diferentes contextos de densidad arbórea. Esto último para estudiar diferentes situaciones de competencia por los recursos (Yang et al., 2021). El objetivo propuesto fue determinar la tasa de crecimiento del guatambú (*Balfourodendron riedelianum* Engl.) y analizar su relación con el tamaño del individuo y el contexto de competencia en el cual se desarrolla, en bosques nativos del NE argentino. Con la información generada se espera aportar conocimiento que promueva el desarrollo de actividades productivas más diversificadas y, de esta manera, contribuir a la conservación de la biodiversidad en los sistemas productivos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio, diseño experimental y colecta de datos en campo

El estudio se llevó a cabo en la Reserva de Uso Múltiple Guaraní (RUMG - FCF, Universidad Nacional de Misiones), en la provincia de Misiones, Argentina ($26^{\circ}54'40.6''\text{S}$ $54^{\circ}13'39.1''\text{W}$). Los datos se recopilaban en 18 parcelas permanentes de 4 ha cada una, con un área efectiva de medición de 1 ha desde el centro hacia los márgenes, totalizando 18 ha. En cada parcela, para cada árbol con DAP ≥ 10 cm se cartografió su coordenada cartesiana con referencia al origen (0,0) en el vértice suroeste de cada parcela, se marcó e identificó a nivel de especie y se midió su DAP. Las mediciones iniciaron en 1998 y se realizaron censos sucesivos hasta 2019 (Bedrij et al., 2022).

Procesamiento y análisis de datos

Por su aptitud forestal y su abundancia a campo, se seleccionó la especie guatambú (o guatambú blanco) *Balfourodendron riedelianum* Engl., de la familia Rutaceae. Se trabajó con un total de 270 individuos, y se consideraron 1024 registros desde 1998 hasta 2019. El **tamaño** se determinó a partir de los registros de diámetro del fuste a la altura del pecho, que se registra a campo en cada medición del ensayo. La **competencia** se determinó mediante la suma del área basal de los fustes vecinos distanciados a ≤ 15 m, ponderando la distancia de cada individuo focal, según la fórmula $Competencia_i = \sum BA_{kj} * dist_{ki}^{-1}$; donde $Competencia_i$ es la Competencia del i-ésimo individuo focal, BA_{kj} es el área basal del k-ésimo individuo vecino en el censo j, y $dist_{ki}^{-1}$ es la distancia euclidiana (m) entre el i-ésimo individuo focal y el k-ésimo individuo vecino. El **crecimiento relativo** se calculó como la diferencia de tamaño diamétrico para un mismo individuo entre un censo y el siguiente ($\Delta DAP_{(T1-T0)} / DAP_{(T0)}$) considerando el cambio de tamaño diamétrico ($\Delta DAP_{(T1-T0)}$) relativo al tamaño inicial de cada individuo ($DAP_{(T0)}$).



Se utilizaron modelos lineales mixtos para estimar la tasa de crecimiento relativo del individuo en función de su tamaño inicial y su competencia, determinados por su DAP y su área basal vecina, respectivamente. Los individuos registrados en los censos se consideraron como factor aleatorio. Se trabajó con un modelo $\log(Y_{ij}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot \log(\text{tamaño}_{ij}) + \beta_2 \cdot \text{competencia}_{ij} + u_i + \varepsilon_{ij}$. Se utilizó el paquete lme4 (Bates et al., 2015) para la construcción de modelos y se seleccionó el modelo más parsimonioso basado en el criterio de información de Akaike (AIC). Los análisis se realizaron en ambiente R v4.4.0 (R Core Team, 2024).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluaron 270 individuos con tamaños (DAP) entre 10 y 64 cm, y competencias entre 0 y 3,4 m² en una superficie de 706,86 m² alrededor de cada individuo. Se observó un crecimiento relativo desde casi nulo hasta 0,06, variable entre individuos y relacionado con el tamaño y el contexto de competencia. En particular, el crecimiento relativo se redujo a mayor tamaño inicial y a mayor competencia en la vecindad.

Con relación al tamaño, como es de esperar, los resultados mostraron que individuos más pequeños crecen proporcionalmente más rápido que individuos más grandes (Figura 1). La variación en el crecimiento también fue explicada por la competencia. Se observó que los individuos más aislados, es decir con menor área basal vecina, crecieron relativamente más en comparación con individuos con mayor área basal vecina en sus alrededores. Cabe aclarar que la competencia en individuos más pequeños (DAP entre 10 y 20 cm) varió entre 0,15 y 3,29 m², mientras que, en aquellos individuos con DAP \geq 60 cm presentó menos variabilidad, ya que se concentró en valores entre 1,3 y 1,8 m².

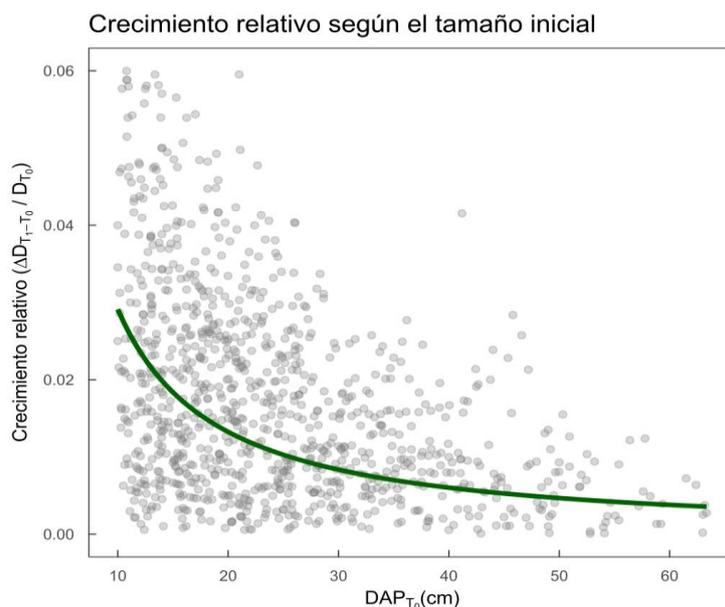


Figura 1. Crecimiento relativo en función del tamaño inicial considerando una competencia promedio (1,36 m²), representada por el área basal de los individuos localizados a una distancia \leq 15 m del árbol focal. Cada punto gris corresponde a un registro de un individuo.

El modelo ajustado fue $Crec_{rel.} = \exp^{(-0.671 + (-1.136) \log(\text{Tamaño}T_0) + (-0.181 \text{Competencia}T_0))}$, la proporción de la varianza marginal (R²m) y condicional (R²c) explicada fue 0,235 y 0,568 respectivamente. Considerando una competencia promedio entre individuos (1,36 m²), podríamos comparar el crecimiento relativo entre individuos de distinto tamaño, por ejemplo, uno con DAP = 10 cm y otro DAP = 20 cm. Al sustituir los valores en la ecuación resultante y efectuar los cálculos correspondientes, obtendremos valores de crecimiento relativo de 0,029 y 0,013, para individuos con 10 cm y 20 cm, respectivamente. Es decir, para un mismo nivel de competencia, el crecimiento relativo se reduce cerca del 50 % cuando se considera individuos de 10 o 20 cm. Por otra parte, si se calcula el crecimiento relativo de un individuo manteniendo constante su tamaño (DAP = 10 cm) pero variando su grado de competencia (competencia de 1 y 2 m²) se observa que este crecimiento se reduce cerca de 20 %, pasando de 0,031 a 0,026, respectivamente. Lo cual refleja el efecto negativo de la competencia sobre el crecimiento.



Estos resultados resaltan la importancia de priorizar el manejo efectivo de los individuos en las etapas más tempranas posibles para promover su crecimiento. Asimismo, los hallazgos de este trabajo son muy relevantes para el manejo forestal, sugiriendo la posibilidad de incorporar un criterio de competencia junto al criterio del diámetro mínimo de corta (DMC) en la selección de los individuos a extraer para mejorar la sustentabilidad de la operación.

4. CONCLUSIONES

Este sólido estudio en Guatambú, que incluyó 270 árboles en condiciones de desarrollo natural en bosque nativo, muestra que tanto el tamaño del individuo como el contexto de competencia en el cual se desarrolla influyen su tasa de crecimiento relativa. Estos hallazgos tienen implicancias en el actual manejo de la especie y contribuyen a mejorar el criterio de manejo establecido (basado en el criterio de diámetro mínimo de corta) sumando el aspecto de la competencia en la selección de individuos a cosechar a fin de favorecer el crecimiento de los individuos remanentes. Por otro lado, la variabilidad de la tasa de crecimiento entre individuos, con cambios de hasta 5 veces, pone en evidencia ejemplares con tasas de crecimiento sobresalientes. Este aspecto, sumado a la trazabilidad de los individuos estudiados, sugiere la posibilidad de proyectar planes de mejoramiento tendientes a multiplicar individuos con crecimiento destacado. Estudios posteriores profundizando en otros factores (como genética, sanidad, suelo, etc.) podrían permitir identificar las características particulares que otorgan ventajas a dichos individuos.

5. REFERENCIAS

- BATES, D.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.; WALKER, S. 2015. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1): 1–48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- BEDRIJ, N.A.; MAC DONAGH, P.M.; PUTZ, F.E.; GATTI, M.G. 2022. Selective logging of a subtropical forest: Long-term impacts on stand structure, timber volumes, and biomass stocks. *For. Ecol. Manag.* 518, 120290. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120290>
- BOWMAN, D.M.; BRIENEN, R.J.; GLOOR, E.; PHILLIPS, O.L.; PRIOR, L.D. 2013. Detecting trends in tree growth: not so simple. *Trends in plant science* 18(1): 11-17.
- DUMMEL, C. 2021. Guatambú blanco, *Balfourodendron riedelianum*. Ficha técnica. <https://www.fcf.unam.edu.ar/la-facultad/secretarias/extension/conociendo-biodiversidad-fcf/balfourodendron-riedelianum/>
- GALARCO, S.P.; RAMILO, D.I. 2019. Plantaciones Forestales en Argentina: Fundamentos técnicos y metodologías para la realización de forestaciones en diferentes regiones. Apuntes de cátedra. FCAyF, UNLP. 377pp.
- IFONA. Instituto Forestal Nacional. 2004. Fichas técnicas de especies nativas e implantadas de Argentina. Material digitalizado en 2004. Disponible en: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-forestal-industrial/biblioteca_forestal/ficha_tecnica/
- MAyDS; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. 2023. Anuario de Estadística Forestal: Productos primarios, carbón y durmientes. Incendios Forestales. Comercio exterior (Año 2022) –Edición 2023. http://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2018/11/anuario_de_estadistica_forestal_2022.pdf
- ORTEGA TORRES, E.; STUTZ DE ORTEGA, L.; SPICHIGER, R. 1989. Noventa especies forestales del Paraguay. *Flora del Paraguay, Serie Especial* nº3. 217 pp.
- PNEF. Programa Nacional de Estadística Forestal. 2025. Sistema Nacional de Monitoreo de Bosques Nativos (SNMBN), Dirección de Bosques Nativos, Dirección Nacional de Recursos Naturales, Subsecretaría de Ambiente de la Nación.
- R Core Team, 2024. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- SCHÖNGART, J. 2008. Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. *Forest Ecology and Management* 256 (2008) 46–58. UICN. 2025. <https://www.iucnredlist.org/species/32987/9741568>
- YANG, J.; SONG, X.; ZAMBRANO, J.; CHEN, Y.; CAO, M.; DENG, X.; ZHANG, W.; YANG, X.; ZHANG, G.; TANG, Y.; SWENSON, N.G. 2021. Intraspecific variation in tree growth responses to neighbourhood composition and seasonal drought in a tropical forest. *Journal of Ecology* 109(1): 26-37.



MODELOS ALTURA DIÁMETRO PARA TRES ESPECIES DE QUEBRACHOS DEL PARQUE CHAQUEÑO, ARGENTINA

Sebastian KEES¹; Julio F. MICHELA²; Maria G. SENILLIANI³; Pablo PERI⁴

RESUMEN

El presente trabajo, busca ajustar una función predictora de altura total por clase diamétrica a partir del diámetro normal como variable regresora, para 3 especies representativas de los bosques de dos subregiones del Parque chaqueño. Se utilizaron datos de parcelas del 2° Inventario Nacional de Bosques Nativos, de planes de manejo y del INTA, particularmente las correspondientes al Chaco semiárido y Chaco húmedo. De cada parcela circular de 1000 m² se emplearon pares de valores de altura diámetro de *Aspidosperma quebracho-blanco*, *Schinopsis balansae* y *Schinopsis lorentzii* a partir de los 5 cm de DAP. Los resultados muestran que los estadísticos de evaluación del modelo ajustado son satisfactorios, constituyendo una herramienta técnica fundamental para la gestión sostenible de los bosques de la región.

Palabras clave: *función hipsométrica, quebrachos, bosques nativos*

1. INTRODUCCIÓN

Los resultados del 2° Inventario Nacional de Bosques Nativos (MAyDS, 2020) arrojan una superficie estimada de bosques para la región Parque chaqueño de 31.945.135 hectáreas, que representa el 67 % de los bosques nativos del país, donde las provincias de Chaco, Formosa, Salta y Santiago del Estero concentran el 65 % de los bosques. Brown (2009) y Martínez Pastur et al. (2021a) señalan que la superficie boscosa en la Argentina sufre una continua disminución y degradación, debido a la expansión de la ganadería extensiva de monte, explotaciones forestales intensivas sin planificación y cambio de uso de la tierra para actividades productivas pecuarias y agrícolas. Ante esta situación, Martínez Pastur et al. (2021b) recomiendan una silvicultura de precisión adaptada a cada región, para formular pautas de manejo y conservación de los ecosistemas a escala regional. De acuerdo con Ramírez y Torres (1985) la evaluación de los recursos forestales tiene como objetivo principal el determinar su importancia y grado de utilidad para planificar su aprovechamiento, en la diversidad de bienes y servicios que de ellos se obtienen. En este sentido, la modelación estadística de las relaciones alométricas de los bosques y sus especies constituyen un recurso útil para realizar una correcta estimación de sus dimensiones (García-Cuevas et al., 2016). La altura de los árboles es una variable indispensable para la determinación de la productividad forestal (Vanclay, 1994), fundamental para las estimaciones de crecimiento y rendimiento utilizadas en los programas de manejo (Borders & Bailey, 1986). En los inventarios forestales, la altura de los árboles no se mide en la totalidad debido a la dificultad de medición, el tiempo requerido y los costos que esto genera (Zhang et al, 2002). En la región se han ajustado diferentes modelos puntualmente locales para algunas de estas especies a partir de estudios de crecimiento y relevamiento de plantaciones comerciales (Giménez y Ríos, 1999; Pece, 2006; Pérez et al, 1993; Delvalle y Pérez 2019; Orquera et al, 2023). Este trabajo tiene por objetivo ajustar una función predictora de la altura total (HT) por clase diamétrica para quebracho blanco

¹ Campo Anexo Estación Forestal Plaza – Estación Experimental Agropecuaria Sáenz Peña. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). kees.sebastian@inta.gob.ar – Consejo Profesional de Ciencias Forestales del Chaco.

² Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). michela.julio@inta.gob.ar

³ Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques (INSIMA) Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE). senilliani@gmail.com

⁴ Estación Experimental Agropecuaria Santa Cruz. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). peri.pablo@inta.gob.ar



(*Aspidosperma quebracho – blanco*) y los quebrachos colorados chaqueño (*Schinopsis balansae*) y santiagueño (*Schinopsis lorentzii*) de dos subregiones del Parque Chaqueño.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El Parque chaqueño se encuentra ubicado en el norte de Argentina y equivale al territorio fitogeográfico descrito por Cabrera (1971) como Provincia Chaqueña. El mismo pertenece al dominio Chaqueño de la Región Neotropical. La región presenta gran diversidad de ambientes: extensas llanuras, sierras, grandes ríos con antiguos cauces y lagunas semilunares, sabanas secas e inundables, esteros, bañados y salitres, que albergan diferentes tipos de ecosistemas, entre ellos bosques y arbustales. Su clima puede considerarse del tipo subtropical, con vientos húmedos provenientes del Océano Atlántico que determinan que el sector oriental reciba un nivel mayor de precipitaciones y, en consecuencia, que resulte más húmedo que la porción occidental, la que muestra una marcada estación seca en el invierno (SAyDS, 2005). Para ajustar el modelo, se utilizó información proveniente de tres fuentes principales: parcelas del 2° Inventario Nacional de Bosques Nativos (2021) en la región del Parque Chaqueño, planes de manejo en el marco de la Ley 26.331 y relevamientos prediales realizados por el INTA. En total, se analizaron 11.385 pares de datos de altura (HT, en metros) y diámetro normal (DAP, en centímetros) correspondientes a tres especies: *Aspidosperma quebracho-blanco* (Schltr.), *Schinopsis balansae* (Engl) y *Schinopsis lorentzii* (Griseb.). Estos datos provienen de 256 parcelas circulares de 1000 m² ubicadas en el Chaco Húmedo y 1298 en el Chaco Semiárido, todas con registros de altura total para individuos con un DAP igual o superior a 5 cm. Los datos se agruparon en clases diamétricas de 5 cm de amplitud, se procesaron en hojas de cálculo y se analizaron estadísticamente con el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2020). Como paso inicial, se depuraron los datos para descartar valores atípicos que se desviaban de la relación esperada entre variables (Volke, 2008), por especie y subregión, evitando así distorsiones en los parámetros estimados. Luego, se ajustó un modelo polinómico de segundo grado por especie y clase diamétrica. La calidad del ajuste se evaluó mediante R² ajustado y el error cuadrático medio (CME), de acuerdo con Pompa-García et al. (2011) y Vibrans et al. (2015).

El modelo ajustado fue:

$$HT = a + b * PMC + c * PMC ^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: HT = altura total (m); PMC = punto medio de clase diamétrica (cm).

El uso del PMC se justifica estadísticamente por su capacidad para reducir la variabilidad dentro de cada clase, evitando distorsiones por valores extremos o errores de medición, contribuyendo a mejorar la estabilidad del modelo y captar la tendencia general de la relación altura-diámetro de forma más robusta. En este sentido, el PMC representa adecuadamente el centro de cada clase diamétrica, lo que facilita la aplicación del modelo en inventarios forestales y planificación silvícola.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan los valores descriptivos por subregión de las variables empleadas, observándose una alta variabilidad en las mismas. Esto se debe al abordaje con escala regional del trabajo, donde la distribución de las parcelas abarcó diferentes bosques, condiciones climáticas, edáficas y de manejo.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las variables analizadas de cada especie para cada Subregión.

SUBREGION	ESPECIE	N	DAP (cm)		HT (m)	
			MEDIA	CV (%)	MEDIA	CV (%)
Chaco Húmedo	<i>Aspidosperma quebracho-blanco</i>	608	18,6±10,2	54,9	8,27±2,8	33,7
	<i>Schinopsis balansae</i>	774	22,3±11,8	52,8	9,94±2,8	27,9
	<i>Schinopsis lorentzii</i>	46	20,7±8,5	41,1	10,12±2,6	25,7
Chaco Semiárido	<i>Aspidosperma quebracho-blanco</i>	6530	19,2±10,1	52,4	8,05±3,0	36,9
	<i>Schinopsis balansae</i>	145	18,7±9,3	49,5	8,96±2,3	25,8
	<i>Schinopsis lorentzii</i>	3282	21,15±11,5	54,3	9,8±3,2	32,9



Los valores promedio de altura y diámetro de *Schinopsis balansae* son notablemente mayores en el Chaco Húmedo que en el Semiárido. En cambio, *Aspidosperma quebracho-blanco* muestra valores más altos en el Chaco Semiárido, mientras que *Schinopsis lorentzii* presenta promedios similares en ambas regiones.

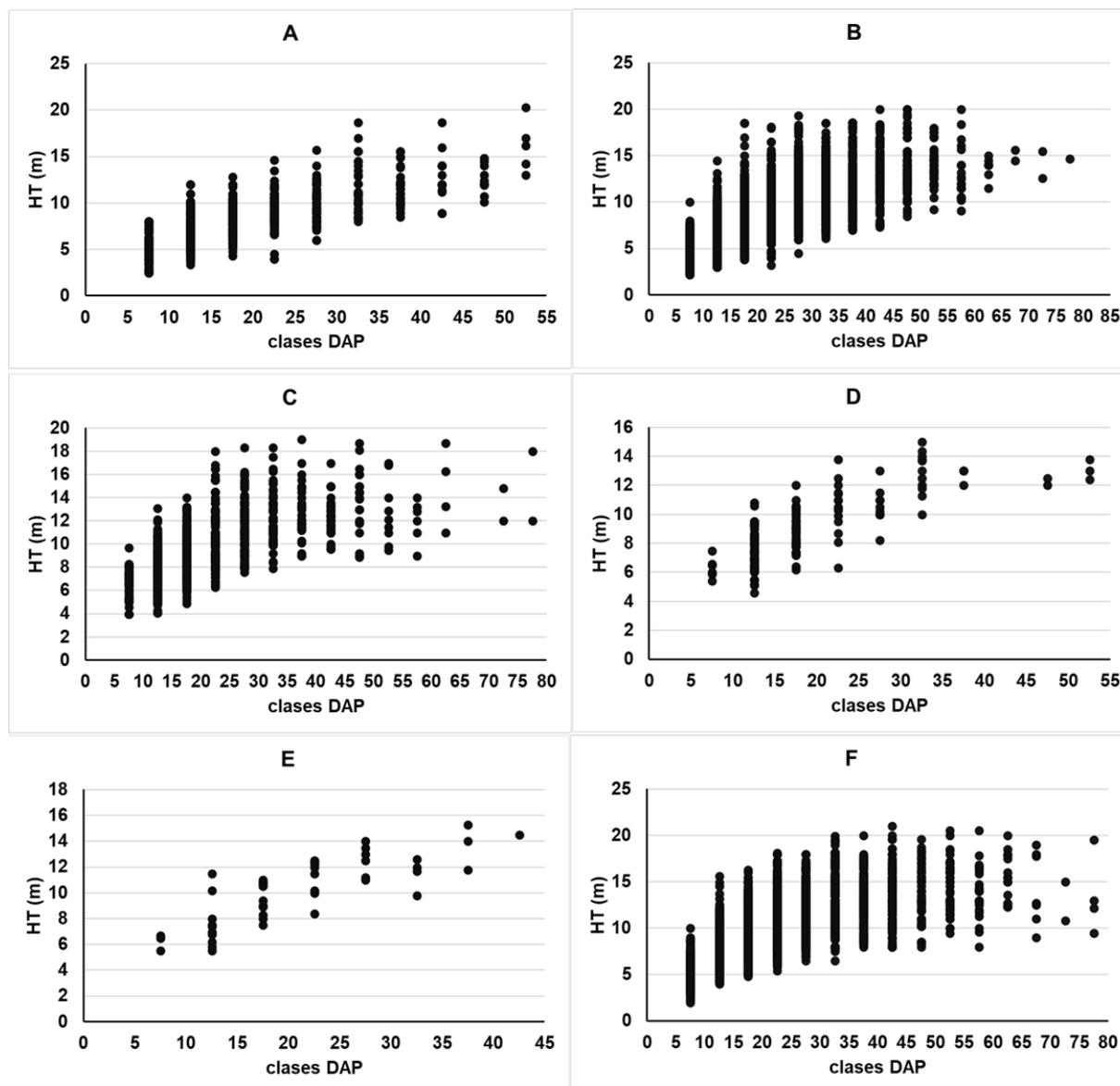


Figura 1. Dispersión de pares de valores Altura-diámetro en las 3 especies estudiadas. A) *A. quebracho blanco* en el Chaco húmedo, B) *A. quebracho blanco* en el Chaco semiárido C) *S. balansae* en el Chaco húmedo, D) *S. balansae* en el Chaco semiárido. E) *S. lorentzii* en el Chaco húmedo, F) *S. lorentzii* en el Chaco semiárido.

La Figura 1 muestra una correlación positiva entre la altura y el PMC en todos los casos. Además, se observa que la mayoría de los datos provienen del Chaco Semiárido, probablemente debido a la mayor extensión de bosques en esa región. En el Cuadro 2, los estadísticos de ajuste de los modelos correspondientes a la Ecuación 1; son altamente satisfactorios para el conjunto de datos regional y también para cada especie por clase de diámetro. Para *A. quebracho blanco* las clases diamétricas estudiadas llegan hasta los 52,5 cm en el Chaco húmedo y los 77,5 en el Chaco semiárido; para *S. balansae* fueron las de 77,5 cm y 52,5 cm; mientras que para *S. lorentzii* fueron las de 42,5 cm y 77,5 cm respectivamente.

**Cuadro 2.** Estadísticos de ajuste del modelo empleado.

Especie	Subregión	Parámetros			R ² Ajust	CME
		a	b	c		
<i>Aspidosperma quebracho blanco</i>	húmedo	4,1345	0,2261	-0,0003	0,94	2,33
	semiárido	2,7456	0,3314	-0,0023	0,97	0,84
<i>Schinopsis balansae</i>	húmedo	5,7544	0,2253	-0,0015	0,87	1,90
	semiárido	3,0771	0,4230	-0,0045	0,95	0,73
<i>Schinopsis lorentzii</i>	húmedo	3,0865	0,4329	-0,0040	0,94	1,06
	semiárido	3,4251	0,3884	-0,0034	0,96	0,62

Los altos valores de R² ajustado y los bajos errores cuadráticos medios obtenidos confirman que la elección del PMC como variable regresora no compromete la precisión, sino que la fortalece en contextos regionales como los estudiados.

Estos modelos permiten obtener estimaciones concordantes con resultados obtenidos por otros autores (Giménez y Ríos, 1999; Pece et al, 2006) para *Schinopsis lorentzii* en el Chaco semiárido y para plantaciones de *Schinopsis balansae* en el Chaco húmedo (Pérez et al, 1993; Delvalle y Pérez 2019; Orquera et al, 2023), no obstante, no existen otras experiencias para bosques nativos de las especies a nivel regional con las que se puedan realizar comparaciones.

4. CONCLUSIONES

Los modelos de predicción de altura total ajustados en este estudio cumplen satisfactoriamente con el objetivo planteado, al proporcionar estimaciones confiables por clase diamétrica para el quebracho blanco y los quebrachos colorados chaqueño y santiagueño. Estos modelos, desarrollados específicamente para dos subregiones del Parque Chaqueño, constituyen una herramienta sólida para la caracterización estructural y la planificación silvícola en los bosques donde estas especies están presentes.

5. LITERATURA CITADA

- BORDERS, B.E.; BAILEY, R.L. 1986. A compatible system of growth and yield equations for slash pine fitted with restricted three-stage least squares. *Forest Science* 32(1):185-201. <https://doi.org/10.1093/forestscience/32.1.185>
- BROWN, A. 2009. Bosques Nativos de Argentina ¿seguimos lamentando lo perdido o vemos que hacemos con lo que tenemos? (Escrito con motivo del Congreso Forestal Mundial, Buenos Aires, octubre 2009). Disponible en: http://www.cebem.org/cmsfiles/articulos/bosques_nativos_argentina.pdf
- CABRERA, A. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* XIV: 1-42
- DELVALLE, P.; PÉREZ, V.R. 2019. Ensayos silviculturales del quebracho colorado chaqueño en la provincia del Chaco. Informe técnico de avance interno. Empresa Indunor S.A. 37 p.
- DIRECCIÓN NACIONAL DE BOSQUES. 2021. Datos del Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos de la República Argentina. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación.
- DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- GARCÍA-CUEVAS, X.; HERRERA-ÁVILA, V.; HERNÁNDEZ-RAMOS, J.; GARCÍA-MAGAÑA, J.J.; HERNÁNDEZ-RAMOS, A. 2016. Ecuaciones para predecir el diámetro normal en función del diámetro del tocón para *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencia Forestales* 7(37) 95-103.
- GIMÉNEZ, A.; RÍOS, N. 1999. Crecimiento de *Schinopsis quebracho-colorado* (Schlecht.) Barkl. et Meyer, Anacardiaceae. *Madera y Bosques* 5(2): 35-51.
- MARTÍNEZ PASTUR, G.; SCHLICHTER, T.; GOWDA, J.H.; HUERTAS HERRERA, A.; TORO MANRÍQUEZ, M.; LENCINAS, M.V.; MANGHI, E.; MATTEUCCI, S.D.; CELLINI, J.M.; PERI, P.L. 2021a. Capítulo 5. Beneficios e



impactos de la promulgación de la ley n° 26.331, y factores de cambio que influyen sobre su implementación. *Uso Sostenible del Bosque Nativo: Aportes desde la Silvicultura Argentina*. Pablo Luis Peri; Guillermo Martínez Pastur; Tomás Schlichter Editores. ISBN 978-987-46815-4-6

- MARTÍNEZ PASTUR, G.; HUERTAS HERRERA, A.; ROSAS, Y.M.; BARRERA, M.D.; AMORO-SO, M.M.; ALCOBÉ, M.F.; DÍAZ DELGADO, R.; ROIG, F.A.; MATTEUCCI, S.D.; PERI, P.L. 2021b. Capítulo 12. Influencia del cambio climático y variaciones en el clima sobre los bosques nativos de Argentina: ¿qué estrategias de manejo y conservación deberían considerarse?. *Uso Sostenible del Bosque Nativo: Aportes desde la Silvicultura Argentina*. Pablo Luis Peri; Guillermo Martínez Pastur; Tomás Schlichter Editores. ISBN 978-987-46815-4-6
- MAYDS. 2020. Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos: informe Parque Chaqueño: primera revisión. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, Buenos Aires. Argentina.
- ORQUERA, R.M.; RUÍZ DÍAZ, M.; VELAZCO, J.P.; PÉREZ V.R. 2023. Estructura y dinámica inicial de una forestación de *Schinopsis balansae* Engl. *FAVE Sección Ciencias Veterinarias* 22, e0011, 2023.
- PECE, M.G.; BENÍTEZ, C.; JUÁREZ, M.; MARIOT, V.; SANGUEDOLCE, J.; PRANZONI, O. 2006. Modelación de la altura total para quebracho colorado santiagueño (*Schinopsis quebracho-colorado*). *Foresta Veracruzana* 8(1): 1-7.
- PÉREZ, V.R.; OVIEDO, R.C.; DELVALLE, P.; CAÑETE, M.C.; RHINER, G.R.; GÓMEZ, C.A. 1993. Comportamiento de *Schinopsis balansae* Engl. en parcelas ubicadas en el Chaco Oriental. *Actas del Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano*. Paraná, Entre Ríos. 77 pp.
- POMPA-GARCÍA, M.; DE LOS SANTOS-POSADAS, H.; ZEPEDA-BAUTISTA, M.E.; CORRAL-RIVAS, J.J. 2011. Un modelo dendrométrico para estimación del diámetro normal a partir de las dimensiones del tocón. *Agrociencia* 45(3): 379-387.
- RAMÍREZ, M.H.; TORRES, R.J. 1985. Análisis del desarrollo y estado actual de las experiencias prácticas y técnicas en la evaluación de plantaciones. *In: Tercera reunión nacional sobre plantaciones forestales*. Publicación Especial Instituto Nacional Investigaciones Forestales 48: 35-43.
- SAyDS. 2005. Primer Inventario Nacional de Bosques Nativos. Buenos Aires, Argentina: SAyDS, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/primer-inventario-nacionalbosques-nativos>
- VANCLAY, J. 1994. *Modelling forest growth and yield: Applications to mixed tropical forests*. London, UK: CAB International.
- VIBRANS, A.C.; MOSER, P.; ZIMERMANN, L.; MAZANEURO, J. 2015. Height-diameter models for three subtropical forest types in Southern, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia* 39(3): 205-215.
- VOLKE, H.V. 2008. Estimación de funciones de respuesta para información de tipo no experimental, mediante regresión. *Colegio de Postgraduados*. Montecillo, Edo. de Méx. México. 113 p.
- ZHANG, L.; PENG, C.; HUANG, S.; ZHOU, X. 2002. Development and evaluation of ecoregion-based jack pine height-diameter models for Ontario. *Forestry Chronicle* 78(40): 530-538.



RELACIONES ENTRE VARIABLES DASOMÉTRICAS DE BOSQUES NATIVOS DE LA PROVINCIA DEL CHACO, ARGENTINA

Sebastian KEES¹; Dante LOTO²; Santiago TELLERIA³; Maximiliano AZCONA³; Eduardo MANGHI³; Pablo PERI⁴

RESUMEN

Este estudio examina las relaciones entre variables dasométricas —volumen total, área basal y densidad— en bosques nativos de la provincia del Chaco, Argentina, utilizando datos del Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos. Se analizaron 541 parcelas circulares de 1000 m², distribuidas en dos subregiones ecológicas: Chaco Húmedo y Chaco Semiárido. Las estimaciones de volumen se realizaron mediante ecuaciones específicas por especie; en casos donde no se disponía de ecuaciones adecuadas o los individuos excedían el rango de tamaño, se aplicaron ecuaciones generales. Los datos fueron procesados y analizados mediante regresión lineal múltiple, ajustando modelos que explican más del 75 % de la variabilidad del volumen total en función del área basal y la densidad. Los modelos mostraron alta calidad de ajuste (R^2 ajustado entre 0,75 y 0,84), validados con criterios estadísticos como AIC, BIC y error cuadrático medio. Se observó que los valores medios de las variables fueron mayores en el Chaco Húmedo respecto al Chaco Semiárido y a los promedios regionales. Los resultados constituyen una herramienta útil para la gestión forestal, facilitando la planificación en contextos ambientales y silviculturales similares mediante una silvicultura de precisión.

Palabras clave: *variables de rodal, bosques nativos, Parque chaqueño*

1. INTRODUCCIÓN

Según el 2º Inventario Nacional de Bosques Nativos (MAyDS, 2020), la región del Parque Chaqueño cuenta con una superficie estimada de 31.945.135 hectáreas de bosques nativos, lo que representa aproximadamente el 67 % del total nacional. Dentro de esta región, la provincia del Chaco presenta una notable concentración de cobertura forestal en la ecorregión semiárida, con 3.244.866 hectáreas de bosques continuos. En contraste, la ecorregión húmeda muestra una cobertura más fragmentada, que abarca unas 1.794.234 hectáreas.

Martínez Pastur et al. (2021) destacan la necesidad de desarrollar una silvicultura de precisión adaptada a las particularidades de cada región, con suficiente flexibilidad para responder a una amplia variedad de escenarios tanto a corto como a largo plazo. Esto permitiría formular recomendaciones de manejo y conservación a escalas regional, provincial o zonal, en función de los ecosistemas involucrados. En este contexto, la evaluación de los recursos forestales debe centrarse en determinar su importancia y grado de utilidad, no solo en términos maderables, sino también considerando la diversidad de bienes y servicios que proveen (Ramírez y Torres, 1985).

Diversos autores coinciden en que la silvicultura moderna se orienta hacia una producción intensiva y de alta precisión, basada en la integración de técnicas avanzadas de manejo del suelo (como la preparación física, el manejo biológico y la nutrición), el uso de material genético mejorado y la

¹ Campo Anexo Estación Forestal Plaza – Estación Experimental Agropecuaria Sáenz Peña. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). kees.sebastian@inta.gob.ar – Consejo Profesional de Ciencias Forestales del Chaco.

² Instituto de Silvicultura y Manejo de Bosques (INSIMA) Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (UNSE), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). danteloto87@gmail.com

³ Dirección Nacional de Bosques. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación (DNB, MAyDS) sdetelleria@ambiente.gob.ar, azconam@ambiente.gob.ar, manghi@ambiente.gob.ar

⁴ Estación Experimental Agropecuaria Santa Cruz. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA). Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). peri.pablo@inta.gob.ar



implementación de buenas prácticas de manejo (Abdelnour et al., 2011; Alvarado, 2016; Murillo et al., 2016). En este modelo, el concepto de calidad se vuelve central, siendo adoptado como parte de las buenas prácticas en empresas forestales altamente eficientes (Vallejos y Murillo, 2024).

La comprensión de las dinámicas de las masas forestales es esencial para su adecuada gestión y planificación. En muchos casos, un inventario cualitativo no es suficiente, siendo necesaria una evaluación cuantitativa mediante la estimación de variables dasométricas y sus relaciones (Cabrera et al., 2014).

En este marco, el presente trabajo tiene como objetivo ajustar una función que relacione el volumen total, el área basal y la densidad de los bosques en dos subregiones de la provincia del Chaco.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se encuentra ubicada en el norte de Argentina (figuras 1A y 1B), dentro de la Región Forestal Parque Chaqueño, que equivale al territorio fitogeográfico descrito por Cabrera (1971) como Provincia Chaqueña. El mismo pertenece al dominio Chaqueño de la Región Neotropical. La región presenta gran diversidad de ambientes: extensas llanuras, sierras, grandes ríos con antiguos cauces y lagunas semilunares, sabanas secas e inundables, esteros, bañados y salitrales, que albergan diferentes tipos de ecosistemas, entre ellos bosques y arbustales. Su clima puede considerarse del tipo subtropical, con vientos húmedos provenientes del Océano Atlántico que determinan que el sector oriental reciba un nivel mayor de precipitaciones y, en consecuencia, que resulte más húmedo que la porción occidental, la que muestra una marcada estación seca en el invierno. Los niveles promedio de precipitaciones alcanzan los 1300 mm anuales hacia al este, y 650 mm anuales hacia el oeste, donde el carácter desigual de las precipitaciones entre el Este y el Oeste permite dividir a la provincia en dos subregiones, que son: a) Chaco semiárido, que se extiende al oeste provincial, desde los 60° LW, y b) el Chaco Húmedo que se extiende desde este meridiano hasta los ríos Paraguay y Paraná. (Gobierno de la provincia del Chaco, 2006).

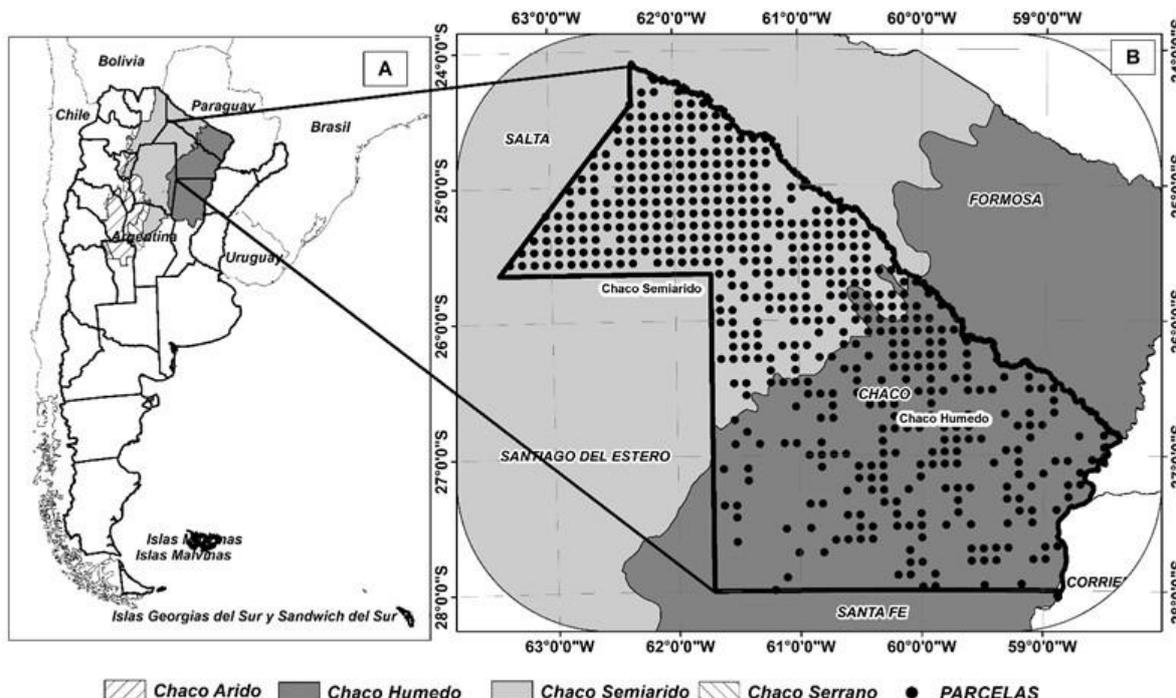


Figura 1. (A) Área de estudio ubicada en Argentina en El Parque Chaqueño. (B) Detalle de la distribución de parcelas dentro de la provincia del Chaco.

Se utilizó información del 2º Inventario Nacional de Bosques Nativos (2ºINBN) correspondiente a la provincia del Chaco, proporcionada por la Dirección Nacional de Bosques (2021) El análisis se basó en datos de área basal (G , m^2/ha), densidad (DPS , individuos/ha) y volumen total (V , m^3/ha) para todas



las especies presentes con un DAP igual o superior a 5 cm, registrados en 626 parcelas circulares de 1000 m² cada una (Figura 1B).

De acuerdo con el MAyDS (2020), las estimaciones volumétricas por parcela se realizaron utilizando ecuaciones específicas para cada especie inventariada en la región y en aquellos casos en que no se disponía de ecuaciones volumétricas en la bibliografía, o cuando los individuos superaban el rango de tamaño establecido para su especie, se aplicó una ecuación general para estimar el volumen. Los datos fueron procesados mediante planillas de cálculo y analizados estadísticamente mediante regresión lineal múltiple, utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2020). A modo preliminar, se efectuó una depuración de los datos para descartar valores atípicos que se desviaban de la relación esperada entre las variables consideradas (Volke, 2008), trabajando con un valor final de 541 parcelas. Luego se ajustó un modelo mediante regresión lineal múltiple (Ecuación 1) similar al propuesto por Revilla Chavez et al., (2021) y Ramirez et al., (2022):

$$\ln(V) = \ln(D) * a + \ln(G) * b + c \quad \text{Ecuación 1}$$

Y su forma simplificada:

$$V = D^{(a)} * G^{(b)} * e^{(c)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde: V = volumen total (m³/ha); G = área basal (m²/ha); D = densidad (individuos/ha); e = base de los Logaritmos naturales.

La calidad del ajuste se evaluó mediante R² ajustado, el error cuadrático medio (CME) y los criterios de información AIC y BIC de acuerdo con Vibrans et al. (2015) y Criollo Escobar et al. (2020).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 1 se presentan los valores medios y desvíos por subregión de las variables empleadas, observándose una alta variabilidad en las mismas. Esto se debe al abordaje con escala provincial del trabajo, donde la distribución de las parcelas abarcó diferentes condiciones climáticas, edáficas y de manejo en toda la provincia.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de las variables de rodal analizadas para cada subregión dentro de la provincia del Chaco.

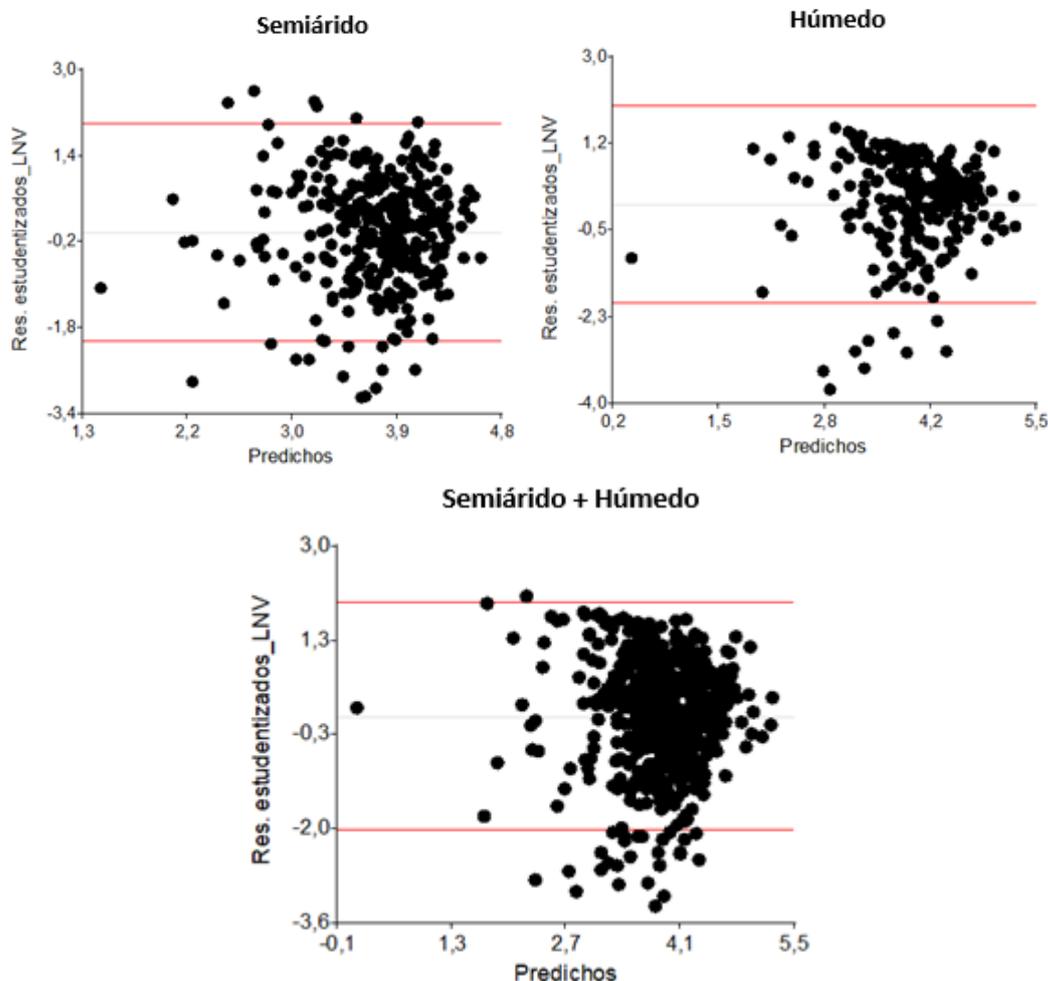
SUBREGIÓN	VARIABLE	N	MEDIA	D.E.	E.E.	MÍN	MÁX
Chaco Húmedo	Área basal (m ² /ha)		11,36	6,04	0,41	0,32	33,81
	Volumen total (m ³ /ha)	219	62,94	36,61	2,47	1,17	198,57
	Densidad (ind/ha)		536,35	293,31	19,82	20	1352
Chaco Semiárido	Área basal (m ² /ha)		9,95	3,36	0,19	1,31	18,73
	Volumen total (m ³ /ha)	322	47,29	21,71	1,21	3,21	114,42
	Densidad (ind/ha)		532,34	252,21	14,06	80	1400
Chaco (semiárido + húmedo)	Área basal (m ² /ha)		10,52	4,68	0,20	0,32	33,81
	Volumen total (m ³ /ha)	541	53,62	29,67	1,28	1,17	198,57
	Densidad (ind/ha)		533,97	269,35	11,58	20	1400

Se puede observar que los valores de las variables son sensiblemente mayores para el Chaco húmedo confrontados con los valores del Chaco semiárido y los valores a nivel provincial, e incluso también, en comparación con los valores medios estimados para la ecorregión en el 2° INBN (MAyDS, 2020), donde la media de volumen fue de 46,86 m³ por hectárea, el área basal media fue de 9,24 m² por hectárea y la densidad media estimada fue de 486,65 individuos leñosos por hectárea.

En el Cuadro 2 se presentan los estadísticos de ajuste del modelo de producción correspondiente a la Ecuación 2; los cuales son altamente satisfactorios para el conjunto de datos provincial y también para cada subregión. La evaluación visual del comportamiento de los residuos no mostró tendenciosidad evidente (Figura 2).

**Cuadro 2.** Estadísticos de ajuste de los modelos de cada grupo y modelo general.

GRUPO	MODELO	N	R ² Aj	ECMP	AIC	BIC
Chaco Húmedo	$V = D^{(-0,03)} * G^{(1,06)} * e^{(1,73)}$	219	0,84	0,08	62,23	75,78
Chaco Semiárido	$V = D^{(0,13)} * G^{(1,08)} * e^{(0,54)}$	322	0,75	0,08	77,54	92,64
TODOS	$V = D^{(0,03)} * G^{(1,06)} * e^{(1,22)}$	541	0,78	0,08	198,45	215,62

**Figura 2.** Diagramas de dispersión de residuos de los modelos de cada subregión y modelo general.

Los modelos ajustados explican en general, para todo el territorio provincial y en particular para cada subregión más del 75 % de la variabilidad del volumen total a partir de la densidad y el área basal en la provincia.

4. CONCLUSIONES

Los modelos de regresión ajustados, que vinculan el volumen de madera con el área basal y la densidad en los bosques nativos del Chaco, son robustos y altamente predictivos (más del 75% de variabilidad explicada). Se confirmó que el Chaco Húmedo presenta mayores volúmenes, áreas basales y densidades que el Semiárido. Estos modelos son esenciales para la gestión forestal de precisión en la provincia, optimizando la planificación de recursos maderables y la conservación del ecosistema.

5. LITERATURA CITADA

ABDELNOUR, A.; AGUILAR, M.; VALVERDE, L. 2011. Micropropagación de pilón (*Hieronyma alchomeoides*). Agronomía Costarricense 35(2): 09-19.



- ALVARADO, D. 2016. Ganancia genética a los 4 años de edad en el programa clonal de pilón (*Hieronyma alchorneoides*) en San Carlos, Zona Norte de Costa Rica (Doctoral dissertation, Tesis Licenciatura Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica).
- CABRERA, J.; LAMELAS, M.T.; MONTEALEGRE, A.L.; DE LA RIVA, J. 2014. Estimación de Variables dasométricas a partir de datos LIDAR PNOA en masas regulares de *Pinus halepensis* Mill. XVI Congreso Nacional de Tecnología de la Información Geográfica 25, 26 y 27 de junio de 2014, pp. 123-129.
- CABRERA, A. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. Boletín de la So-ciedad Argentina de Botánica XIV: 1-42
- CRIOLLO ESCOBAR, H., MUÑOZ BELALCÁZAR, J.; LAGOS BURBANO, T.C. 2020. Modelos alométricos para biomasa y carbono de *Albizia carbonaria* durante la fase de crecimiento vegetativo. Ciencia y Agricultura, 17(3). DOI: <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11384>
- DI RIENZO JA, CASANOVES F, BALZARINI MG, GONZALEZ L, TABLADA M, ROBLEDO CW. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- DIRECCIÓN NACIONAL DE BOSQUES. 2021. Datos del Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos de la República Argentina. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación.
- GOBIERNO DE LA PROVINCIA DE CHACO. 2006. Inventario Forestal 2005: provincia de Chaco. Resistencia, Argentina, Ministerio de la Producción, Librería de la Paz. 148 p
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA NACIÓN. MAyDS. 2020. Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos: Informe región forestal Parque Chaqueño (primera revisión). <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/bosques/segundo-inventario-nacional-de-bosques-nativos/resultados-regionales>
- MURILLO, O.; VALLEJOS, J.; BADILLA, Y.; GUZMÁN, N.; LUJÁN, R.; GONZÁLEZ, E. 2016. Crecimiento efetivo mensual inicial em plantações de teca (*Tectona grandis*) em Costa Rica. Pesquisas Agrárias e Ambientais 4(2): 87-90.
- MARTÍNEZ PASTUR, G.; HUERTAS HERRERA, A; ROSAS, Y.M.; BARRERA, M.D.; AMORO-SO, M.M.; ALCOBÉ M.F.; DÍAZ DELGADO, R.; ROIG, F.A.; MATTEUCCI, S.D.; PERI, P.L. 2021. Capítulo 12. Influencia del cambio climático y variaciones en el clima sobre los bosques nati-vos de Argentina: ¿qué estrategias de manejo y conservación deberían considerarse?. Uso Sostenible del Bosque Nativo: Aportes desde la Silvicultura Argentina. Pablo Luis Peri; Guillermo Martínez Pastur; Tomás Schlichter Editores. ISBN 978-987-46815-4-6
- MAyDS. 2020. Segundo Inventario Nacional de Bosques Nativos: informe Parque Chaqueño: primera revisión. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, Buenos Aires. Argentina.
- RAMÍREZ, M.H.; TORRES, R.J. 1985. Análisis del desarrollo y estado actual de las experiencias prácticas y técnicas en la evaluación de plantaciones. In: Tercera reunión nacional sobre plantaciones forestales. Publicación Especial Instituto Nacional Investigaciones Forestales 48: 35-43.
- RAMÍREZ, J.; CÓRDOVA, M.; IMBAQUINGO, J.; CHAGNA, E. 2022. Modelos alométricos para estimar biomasa aérea en bosques secundarios montanos del noroccidente de Ecuador. Caldasia 44(1): 82-94. Epub April 29, 2022. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n1.88198>
- REVILLA CHÁVEZ, J.M.; ABANTO-RODRÍGUEZ, C.; GUERRA ARÉVALO, W.F.; GARCÍA SORIA, D.; GUERRA ARÉVALO, H.; DOMÍNGUEZ TORREJÓN, G.; DA SILVA CARMO, G.; LUND, I. 2021. Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en plantaciones forestales. Scientia Agropecuaria 12(1): 25-31. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.003>
- VALLEJOS, J.; GAMBOA, O. M. 2024. Modelos alométricos para la estimación del crecimiento del diámetro y altura total de *Hieronima alchorneoides* Allemão cultivado en Costa Rica. Revista Forestal Mesoamericana Kurú, 21(48), 18-26. <https://dx.doi.org/10.18845/rfmk.v21i48.7045>
- VIBRANS, A.C.; MOSER, P.; ZIMERMANN, L.; MAZANEURO, J. 2015. Height-diameter models for three subtropical forest types in Southern, Brazil. Ciência e Agrotecnologia 39(3): 205-215.
- VOLKE, H.V. 2008. Estimación de funciones de respuesta para información de tipo no experimental, mediante regresión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de Méx. México. 113 p.



IMPORTANCIA DEL TEMPERAMENTO DE LEÑOSAS EN SISTEMAS DE USO MÚLTIPLE EN EL BOSQUE DE TRES QUEBRACHOS EN LA REGIÓN CHAQUEÑA, ARGENTINA

Julio F. MICHELA¹; Sebastián M. KEES²

RESUMEN

El estudio analiza el papel del temperamento de las especies leñosas en la sustentabilidad de sistemas de uso múltiple dentro del “bosque de tres quebrachos” de la Región Chaqueña argentina. Mediante un análisis espacial de especies heliófilas y umbrófilas en tres tipos de bosques con diferentes grados de intervención (baja, media y alta), se evaluaron la distribución, la cobertura y el estado sanitario de cada uno. Se compararon los patrones de dispersión entre grupos y se observó una dependencia significativa de las especies umbrófilas con respecto a la cobertura de las heliófilas. Asimismo, se analizó la cobertura de copa según el diámetro a la altura del pecho y el temperamento, observándose una mayor explotación en especies de luz por su valor económico. Mediante un análisis sanitario de las especies umbrófilas se detectó una correlación directa entre la apertura del dosel y el deterioro sanitario. Especies del estrato arbustivo mostraron un comportamiento colonizador en sitios con discontinuidad en la cobertura arbórea. Se concluye que, en este tipo de bosques el conocimiento del temperamento de las especies es fundamental para diseñar combinaciones silvícolas que equilibren producción y conservación estructural. Se recomienda expandir estas investigaciones a otros sectores del Parque Chaqueño.

Palabras clave: *bosques nativos, temperamento, distribución espacial, estructura*

1. INTRODUCCIÓN

Entre las formaciones fisonómicas de la Región Chaqueña Argentina se destacan distintos tipos de bosques caracterizados por la dominancia de especies de *Schinopsis*, como el quebracho colorado chaqueño (*Schinopsis balansae* Engl.) y el quebracho colorado santiagueño (*S. lorentzii* Griseb. Engl.), característicos del Chaco Húmedo y del Semiárido, respectivamente. El área de distribución de estas dos especies se superpone en una franja con sentido SO-NE desde el SE de la Provincia de Santiago del Estero y NO de Santa Fe hacia el centro de Formosa. Sin embargo, su convivencia en sentido estricto es rara. La formación es denominada “bosque de tres quebrachos” por la presencia, además, del *Aspidosperma quebracho-blanco* Schtdl. (Torrella et al., 2011). El hecho de que los bosques nativos de Argentina hayan sido sometidos a severos procesos de degradación, no significa que hayan perdido su potencial; por el contrario, son bosques que bajo prácticas silvícolas tendientes al manejo sustentable pueden ser recuperados (Montenegro et al., 2004). Los bosques de tres quebrachos no escapan a esta realidad, y esto por sí solo es un incentivo para avanzar en el conocimiento del orden natural de los árboles, expresado en datos numéricos, recabando información factible de su empleo en una gestión sensata. En el presente estudio se pretende describir el rol del temperamento de las especies leñosas en el diseño y sostenibilidad de sistemas de uso múltiple en este tipo de bosques, analizando la relación espacial entre especies de temperamento robusto o heliófilas y especies de temperamento delicado o umbrófilas, así como la variación de la cobertura de copa de ambas y la conducta del estrato arbustivo ante la apertura del dosel arbóreo.

¹ Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). michela.julio@inta.gob.ar.

² Campo Anexo Estación Forestal Plaza – Estación Experimental Agropecuaria Sáenz Peña. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). kees.sebastian@inta.gob.ar – Consejo Profesional de Ciencias Forestales del Chaco



Las especies de temperamento robusto o heliófilas requieren ligera protección contra los golpes de sol y las heladas, protección que logran con la vegetación herbácea natural; las de temperamento medio requieren mayor protección que las del primer grupo, se encuentran en bordes de bosques, caminos, chacras o bien en pequeñas abras internas del bosque; las de temperamento delicado o umbrófilas son sensibles a heladas y golpes de sol (Valentini, 1978; Wenzel y Hampel 1998), prefieren o toleran la sombra, y suelen crecer debajo de árboles más grandes. En este contexto, el conocimiento del comportamiento de las leñosas del bosque de los 3 quebrachos permitirá una combinación adecuada de especies que equilibren objetivos de producción y conservación de estructura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El área de estudio se encuentra aproximadamente a 4 kilómetros al norte de la localidad de Concepción del Bermejo, provincia del Chaco (S 26° 21' 17.83" W 61° 01' 49.64"; S 26° 31' 13.47" W 60° 48' 05.76"; S 26° 37' 23.27" W 60° 50' 53.14" y S 26° 32' 21.04" W 61° 04' 35.91"), donde se ubicaron y analizaron tres estados de bosques según su intervención. Se identificaron como Bosque tipo 1 a las formaciones escasamente intervenidas; Bosque tipo 2, a las masas medianamente intervenidas; y Bosque tipo 3, aquellas formaciones que fueron severamente explotadas. En cada tipo de bosque se tomaron 10 parcelas consecutivas, rectangulares, de 1000 m² (10 m de ancho por 100 m de largo).

Dentro de cada parcela, la posición de cada individuo se definió midiendo la distancia al eje central, la cobertura de copas se determinó mediante radios tomados según la orientación del mismo eje y sus perpendiculares (Michela, 2014; Michela y Juárez de Galíndez, 2016; Michela y Kees, 2018). Se utilizó el software QGIS para el análisis de la relación espacial de las especies leñosas heliófilas y las umbrófilas, clasificadas así atendiendo a Hampel y Gómez (2005). Dentro del primer grupo se destacaron el quebracho colorado chaqueño, el quebracho colorado santiagueño y el quebracho blanco, el segundo grupo estuvo representado por el guayaibí (*Patagonula americana* L.) y el ibirá pitá (*Ruprechtia laxiflora* Meisn). Para ello, se generaron capas vectoriales con ubicación georreferenciada de cada individuo. Mediante el complemento "distancias al vecino más cercano" se calcularon las distancias desde cada individuo de temperamento delicado hasta la especie más cercana. Posteriormente, se generó un patrón aleatorio adaptado al área de estudio en igual número al de especies umbrófilas. Finalmente, se calcularon las distancias entre cada uno de estos individuos y el punto aleatorio más cercano mediante la prueba de Wilcoxon para muestras independientes, el análisis se focalizó en el bosque tipo 1 debido a que es el que tiene menos signos de intervención antrópica y lo hace adecuado para estudiar patrones espaciales naturales. Previo al análisis comparativo se analizaron los datos con la prueba de Shapiro-Wilks (modificado). No se obtuvieron registros sobre las fechas, frecuencias y número de intervenciones a las que fueron sometidos los bosques de tipo 2 y 3 al momento de realizarse el estudio.

Seguidamente, utilizando una adaptación de la metodología propuesta por Vega Gutiérrez (1995) se promediaron los radios medios de copa de las leñosas arbóreas para el cálculo de la proyección horizontal de las mismas. La contribución relativa, atendiendo al temperamento, se estimó mediante porcentajes.

Paralelamente, se analizó la sanidad de las especies de temperamento delicado dentro de cada tipo de bosque. Las plantas que fueron clasificadas visualmente como sanas o enfermas y los datos se evaluaron mediante tablas de contingencia. El análisis estadístico se realizó utilizando el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2020). La respuesta del estrato arbustivo frente a la apertura del dosel fue descripta empleando el Índice de Valor de Importancia relativa.

3. RESULTADOS

En el Cuadro 1 se comparan las distancias observadas entre especies de temperamento robusto y delicado, así como las distancias de las especies delicadas y aquellas generadas mediante simulación aleatoria. La prueba de Shapiro-Wilks (modificado) para ambas distancias, arrojó valores de *p* inferiores a 0,05, indicando falta de normalidad en la distribución, por lo tanto, se empleó la prueba estadística no paramétrica de Wilcoxon (Mann-Whitney U), la cual dio un valor de *p* = 0,0075.

**Cuadro 1.** Distancias relevadas y simuladas.

N° PUNTO	DISTANCIA REAL	DISTANCIA ALEATORIA	N° PUNTO	DISTANCIA REAL	DISTANCIA ALEATORIA
1	5,17	7,99	17	4,54	1,49
2	4,43	1,59	18	5,04	1,81
3	4,33	1,80	19	5,47	1,65
4	2,69	3,30	20	4,60	1,03
5	3,99	1,02	21	5,36	9,00
6	1,24	2,07	22	2,40	1,55
7	4,50	5,04	23	1,14	4,85
8	1,30	1,65	24	2,50	1,10
9	3,69	3,35	25	8,41	3,21
10	5,95	1,75	26	8,56	7,76
11	2,95	7,04	27	12,47	1,99
12	5,07	5,39	28	12,76	1,68
13	4,35	1,73	29	7,98	1,69
14	10,66	1,80	30	1,99	9,57
15	4,07	2,03	31	8,67	1,38
16	1,12	9,13	32	5,43	2,10

En el Cuadro 2 se expresan las coberturas de copa de las leñosas arbóreas, clasificadas por temperamento, expresadas tanto en superficie absoluta como en porcentajes de los tres tipos de boques, por clase diamétrica (DAP).

Cuadro 2. Cobertura de copa por tipo de bosque, clase de DAP y temperamento.

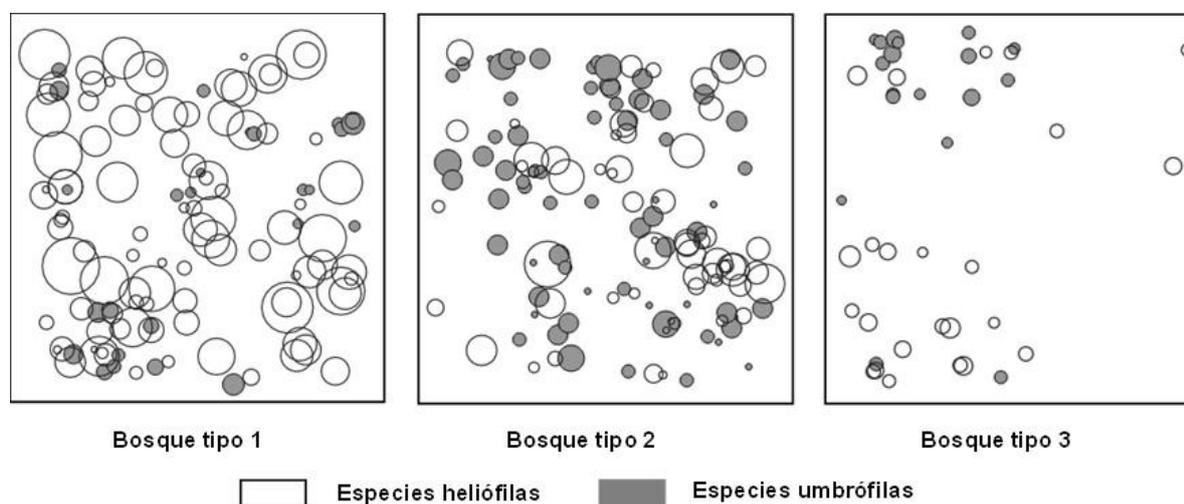
DAP	BOSQUE TIPO 1			BOSQUE TIPO 2			BOSQUE TIPO 3		
	COB. UMBOFILAS	COB. HELIOFILAS	COB. TOTAL	COB. UMBOFILAS	COB. HELIOFILAS	COB. TOTAL	COB. UMBOFILAS	COB. HELIOFILAS	COB. TOTAL
12,5	313	181	494	484	245	729	31	111	142
17,5	85	260	345	333	241	573	106	69	175
22,5	91	337	429	111	193	303	9	58	68
27,5	0	814	814	87	542	629	28	35	63
32,5	0	696	696	0	699	699	0	0	0
37,5	0	1149	1149	0	279	279	0	0	0
42,5	0	764	764	0	0	0	0	0	0
47,5	0	900	900	0	0	0	0	0	0
52,5	0	219	219	0	0	0	0	0	0
57,5	0	314	314	0	0	0	0	0	0
62,5	0	71	71	0	0	0	0	0	0
67,5	0	693	693	0	0	0	0	0	0
Total	489	6400	6889	1015	2199	3214	175	272	447
%	7	93	100	32	68	100	64	26	100

En el Cuadro3 se reseña el estado sanitario de las especies umbrófilas en número y por estado sanitario.

**Cuadro 3.** Estados sanitarios de las especies umbrófilas por tipo de bosque.

TIPO DE BOSQUE	ESTADO SANITARIO	
	Nº DE ESPECIES SANAS	Nº DE ESPECIES ENFERMAS
1	30	3
2	45	22
3	9	9

El análisis mediante tabla de contingencia que compara frecuencias de individuos sanos y enfermos por tipo de bosque dio los siguientes resultados: Chi-Cuadrado de Pearson ($p < 0,0001$); el estadístico de verosimilitud (Maximum Likelihood G^2) fue menor a 0,0001 y la prueba de Cochran-Mantel-Haenszel dio un p mayor a 0,999. Las pruebas derivadas de la tabla de contingencia explican que, si bien la tendencia no es lineal (la sanidad no cambia de manera constante), la proporción de especies sanas y enfermas varía según el tipo de bosque y que hay una asociación estadísticamente significativa entre las dos variables. Esto permite inferir que, al abrir el dosel, las especies de temperamento delicado quedan vulnerables y tienden a deteriorar su estado sanitario. En la Figura 1 se expresa gráficamente el posicionamiento de las leñosas arbóreas utilizando la proyección horizontal de copa real calculada con el radio medio. Además, se observa la relación espacial, la variación estructural y la superposición de copas según el temperamento de las especies componentes en cada situación.

**Figura 1.** Tipos de bosques y su composición según temperamento y cobertura de copas.

Con base en Michela (2014), se evaluó el comportamiento del estrato arbustivo, representado por el garabato (*Acacia praecox* Griseb.) frente a la variación estructural provocado por la explotación forestal, utilizando el IVI tanto en valores absolutos como porcentuales. Los valores registrados fueron: en el monte tipo 1, 71 y 24 %; en el monte tipo 2, 86 y 29 % y en el monte tipo 3 147 y 49 %, respectivamente.

4. DISCUSIÓN

La prueba de Wilcoxon indica que el patrón de distribución de las especies umbrófilas está relacionado de manera significativa al propio de las especies de temperamento robusto. Esta relación apoya lo planteado por Kees y Michela (2020), quienes identifican al guayaibí y al ibirá pitá í como especies de temperamento delicado, cuya persistencia está condicionada a la cobertura generada por las especies heliófilas del estrato superior en la Región Chaqueña Semiárida.

El análisis de la cobertura de copas mostró que el aprovechamiento se concentró en las especies heliófilas; esa situación ya fue reseñada por Hampel y Gomez (2005), quienes atribuyeron esa acción al mayor valor económico de los quebrachos.

Los valores de IVI del garabato indican un avance de la especie a medida que tiene acceso a la luz mostrando un comportamiento colonizador, escenario ya sugerido por Gomez y Kees (2009) para la Región del Chaco húmedo. Expresiones similares brindan Kees et al. (2021) en tipos forestales semejantes de la Región Chaqueña Semiárida.



Se recomienda ampliar este tipo de investigaciones a otras zonas del Parque Chaqueño, donde conviven especies de temperamento diferente, dado que este aspecto se considera clave para sostener la estructura boscosa en sistemas de uso múltiple.

5. LITERATURA CITADA

- DI RIENZO, J.A.; CASANOVES, F.; BALZARINI, M.G.; GONZALEZ, L.; TABLADA, M.; ROBLEDO, C.W. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- GOMEZ, C.; KEES, S. 2009. Comportamiento de heliófitas y sombrívoras en el desarrollo sucesional del bosque del Chaco húmedo. <https://redaf.org.ar/wp-content/uploads/2008/02/Comportamiento-de-heliofitas-y-sombrivoras-en-el-desarrollo-sucesional-del-bosque-del-chaco-humed.pdf>
- GOMEZ, C.; HAMPEL, H. 2005. Dinámica y manejo de bosques en el Chaco húmedo <https://redaf.org.ar/wp-content/uploads/2008/02/Dinamica-y-manejo-de-bosques-en-el-chaco-humedo.pdf>
- KEES, S.; MICHELA, J. 2020. Estructura y composición florística de tres tipos de bosques en la provincia del Chaco. Avances. Vol. 22 N° 1.
- KEES, S.M.; TORRES, S.C.; MORALES, A.; GIRAUDO, L.M.; RUIZ DIAZ, S.; GIODARNO, M.A.; KRONENBERGER, R.Z. 2021. Caracterización de la estructura y composición florística de dos tipos forestales del noroeste de la provincia del Chaco. Quebracho (Santiago del Estero) 29(1): 39-49.
- MICHELA, J. 2014. Estructura, patrón espacial y potencial de regeneración del bosque del centro oeste de la provincia de Chaco, Argentina. Tesis para optar al grado de Master en Gestión y Auditorías Ambientales. Universidad Europea Miguel de Cervantes. Valladolid, Castilla y León. España.
- MICHELA, J.F.; KEES, S.M.; SKOKO, J.J. 2018. Efecto de la acción antrópica en el bosque del centro oeste chaqueño, Argentina. La Revista Forestal Venezolana, 62(1), 69-83.
- MICHELA, J.F.; de GALINDEZ, M.J. 2016. Caracterización de un bosque del centro oeste de la provincia de Chaco, Argentina. Foresta Veracruzana 18 (1): 33-44.
- MONTENEGRO, C.; GASPARRI, I.; MANGHI, E.; STRADA, M.; BONO, J.; PARMUCHI, G. 2004. Informe sobre Deforestación Argentina. S.AyDS. Ministerio de Salud y Ambiente Dirección Bosques, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Argentina. 8 pp.
- TORRELLA, S.A. 2014. Fragmentación y pérdida del "bosque de tres quebrachos" y su comunidad de plantas leñosas en el SO de Provincia de Chaco (Doctoral dissertation, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales).
- TORRELLA, S.A.; OAKLEY, L.J.; GINZBURG, R.G.; ADÁMOLI, J.M.; GALETTO, L. 2011. Estructura, composición y estado de conservación de la comunidad vegetal-leñosa de los bosques de tres quebrachos en el Chaco Subhúmedo Central. Ecología Austral 21 (2): 179-188.
- VEGA GUTIÉRREZ, G. 1975. Análisis estructural de tres comunidades forestales del Bajo Calima, departamento del Valle del Cauca. Colombia. Tesis de Magíster Scientiae. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de Costa Rica. 103 pp.
- VALENTINI, J. 1978. Tratamiento silvicultural de los bosques naturales. Curso de perfeccionamiento profesional. Tomo I. 179-218 pp
- WENZEL, M.; HAMPEL, H. 1998. Regeneración de las principales especies arbóreas del Chaco húmedo argentino. Quebracho 6: 5-18.



IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES PARA LA INSTALACIÓN DE APIARIOS MEDIANTE HERRAMIENTAS GEOMÁTICAS EN PUERTO LIBERTAD, MISIONES ARGENTINA

Débora S. CARDOZO¹; Andres. A. L. LINDAO^{1,2}; Gustavo A. MASLOWSKI¹

RESUMEN

El presente trabajo se desarrolló en el municipio de Puerto Libertad, provincia de Misiones, con el objetivo de identificar áreas aptas para la instalación de apiarios mediante el uso de herramientas geomáticas. La apicultura, actividad esencial para la producción de miel y la polinización de cultivos, está regulada por normativas provinciales que establecen distancias mínimas respecto a centros urbanos, rutas y áreas protegidas. Se utilizaron imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para analizar la cobertura vegetal y aplicar criterios de exclusión, como la presencia de áreas protegidas o plantaciones de *Pinus* y *Araucaria*, especies que no ofrecen recursos significativos para las abejas. A partir de este análisis, se determinó que de las 87.026 hectáreas que conforman el municipio, 63.685 no son aptas para el desarrollo apícola, mientras que 23.341 hectáreas presentan condiciones favorables, representando estas últimas el 26,82 % del total del área de estudio. Los resultados permiten orientar la planificación territorial y fomentar el desarrollo sustentable de la actividad apícola, promoviendo el aprovechamiento eficiente del territorio y la conservación de los recursos naturales.

Palabras clave: *legislación apícola, Apicultura, Apis mellifera, Identificación visual*

1. INTRODUCCIÓN

La apicultura es esencial para la conservación de la biodiversidad y la producción de alimentos, ya que la polinización mejora la calidad y cantidad de semillas y frutos (Meléndez Ramírez et al., 2020). Se estima que el 70 % de las plantas cultivadas dependen de polinizadores (Carvajal, 2020), lo que ha generado un creciente interés en su protección (Ollerton, 1999). La abeja *Apis mellifera*, principal especie polinizadora, está representada en Misiones por un ecotipo local (híbrido) surgido del cruce entre razas africanas y europeas (Villafáfila et al., 2007), que pecorea en un radio de 2 a 4 km alrededor de la colmena (Seeley, 1992; Vides Borrell y Vandame, 2012), recolectando néctar, polen, agua y exudados vegetales como recursos esenciales (Portal Apícola, 2015). En Misiones, la actividad está regulada por las leyes VIII N°41 y XVI N°149. En este contexto, para identificar áreas aptas para apiarios en Puerto Libertad, este trabajo empleó imágenes satelitales y Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten localizar áreas con recursos florales y delimitar territorios favorables para la apicultura (Muñoz, 2017), así como apoyar la planificación territorial mediante cartografía temática y análisis espacial (Rosete y Bocco, 2003).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se llevó a cabo en el municipio de Puerto Libertad, ubicado en el Departamento Iguazú, al norte de la provincia de Misiones, dentro de la Selva Misionera o Provincia Fitogeográfica Paranaense (Gartland, 2008). Esta región posee una alta diversidad vegetal, con más de 3.000 especies vasculares (Giraud et al., 2003), entre las cuales se identifican especies nativas de interés apícola como *Nectandra megapotámica*, *Cordia trichotoma* y *Luehea divaricata* (Cabrera, 1994). Se identificaron

¹ Facultad de Ciencias Forestales – UNaM, Bertoni 124, Eldorado, Misiones, Argentina

² Autor de correspondencia: +54 3751 – 525378; andres.lindao@fcf.unam.edu.ar



cuatro áreas protegidas relevantes dentro del municipio, que, si bien no se consideran aptas para la instalación de apiarios, funcionan como importantes fuentes de alimentación para las abejas.

Obtención de imágenes satelitales

Se utilizaron imágenes Sentinel-2A con resolución de 10 m en el espectro visible, obtenidas desde Copernicus Open Access Hub. Se utilizaron 2 escenas correspondientes al 19/07/23 y 03/07/24, para detectar cambios en el uso del suelo, con énfasis en la expansión de plantaciones forestales de *Pinus* y *Araucaria*, las cuales fueron excluidas por su escaso aporte apícola (Lezzi, 2019).

Legislación (zonificación del área)

La zonificación se basó en criterios establecidos por el artículo 19 de la Ley VIII N°41 de Misiones, que regula las distancias mínimas para la instalación de apiarios: 2.000 m respecto a zonas densamente pobladas, 500 m de lugares de reunión masiva y 100 m de caminos y rutas. A partir de estos parámetros, se generaron *buffers* de exclusión para delimitar áreas no aptas. También se consideraron las áreas naturales protegidas como zonas excluidas para la instalación de colmenas, aunque no para el forrajeo.

Herramientas utilizadas

Se empleó el *software* QGIS 3.30.1 como herramienta principal para la visualización y análisis espacial. Las capas vectoriales fueron obtenidas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y de IDE-Misiones. La clasificación visual de coberturas se realizó mediante la comparación de imágenes satelitales con servidores como *Google Satellite*, *Google Road* y *OpenStreetMap*, permitiendo identificar con precisión los rodales de Gimnospermas y otros usos del suelo relevantes para el análisis apícola.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Áreas identificadas

El lugar óptimo para instalar apiarios es aquel que no depende de una única floración, sino que ofrece una oferta floral diversa y continua durante el año, garantizando alimento suficiente para las abejas y una cosecha sostenible (Baldi Coronel, 2010). En base a este criterio, se clasificó el municipio de Puerto Libertad considerando tres componentes (Figura 1): zonas de influencia según la legislación vigente, áreas naturales protegidas y plantaciones forestales. Para aplicar los criterios legales establecidos por la Ley VIII N°41, se generaron *buffers* de exclusión de 100 m (rutas y caminos), 500 m (lugares de reunión masiva) y 2.000 m (centros urbanos), los cuales fueron disueltos para evitar superposiciones y sobreestimación de superficie.

Zonas no aptas para la instalación de apiarios

Las zonas no aptas fueron determinadas a partir de tres grandes restricciones espaciales:

- **Áreas naturales protegidas**, que abarcan 28.918 hectáreas, fueron excluidas por tratarse de zonas de conservación, no destinadas a producción apícola.
- **Plantaciones forestales** de *Pinus* y *Araucaria*, géneros que no aportan néctar ni polen y que cubren 28.282 hectáreas.
- **Zonas de influencia legal**, que abarcan 12.459 hectáreas en torno a caminos, centros urbanos y puntos sensibles.

La suma de estas áreas resultó en **63.685** hectáreas de superficie no apta para la instalación de apiarios.

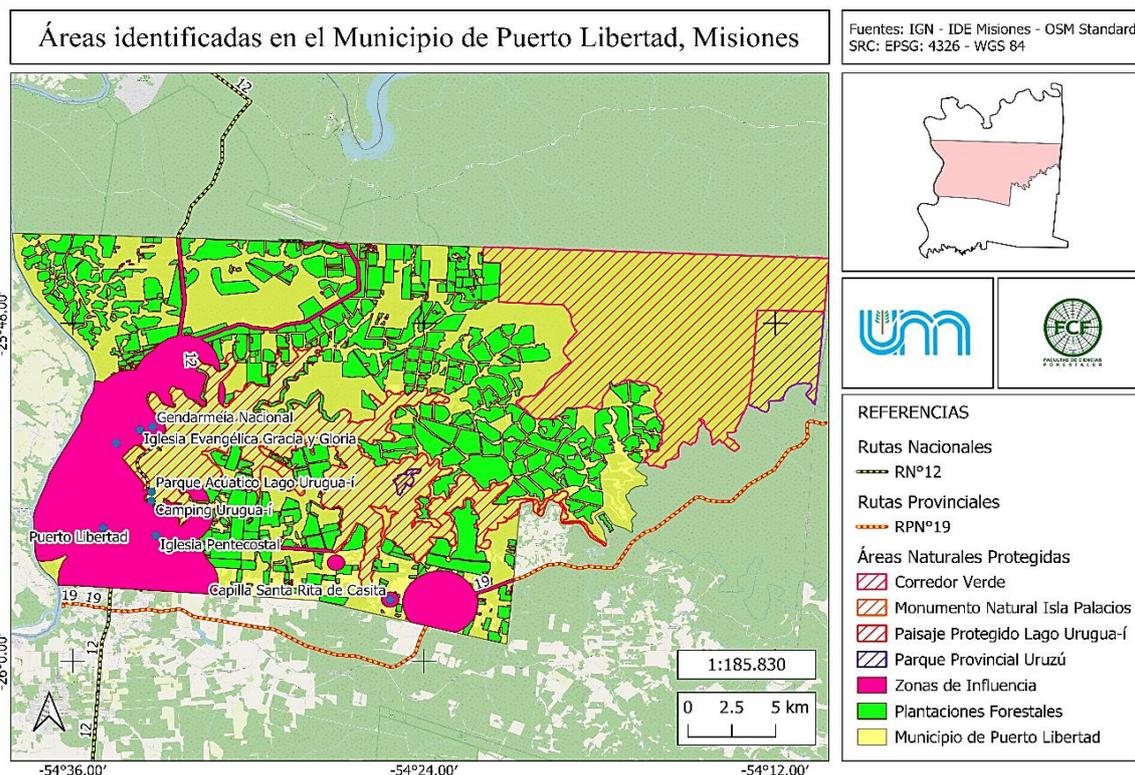


Figura 1. Áreas identificadas según el criterio de clasificación, en el Municipio de Puerto Libertad.

Zonas aptas para la instalación de colmenas

La superficie apta para apicultura se obtuvo restando las zonas no aptas del total del municipio (Figura 2). El resultado fue de **23.341 hectáreas** que cumplen con las condiciones legales y ecológicas necesarias para la instalación de apiarios. Estas zonas representan el espacio disponible y con potencial apícola en Puerto Libertad.

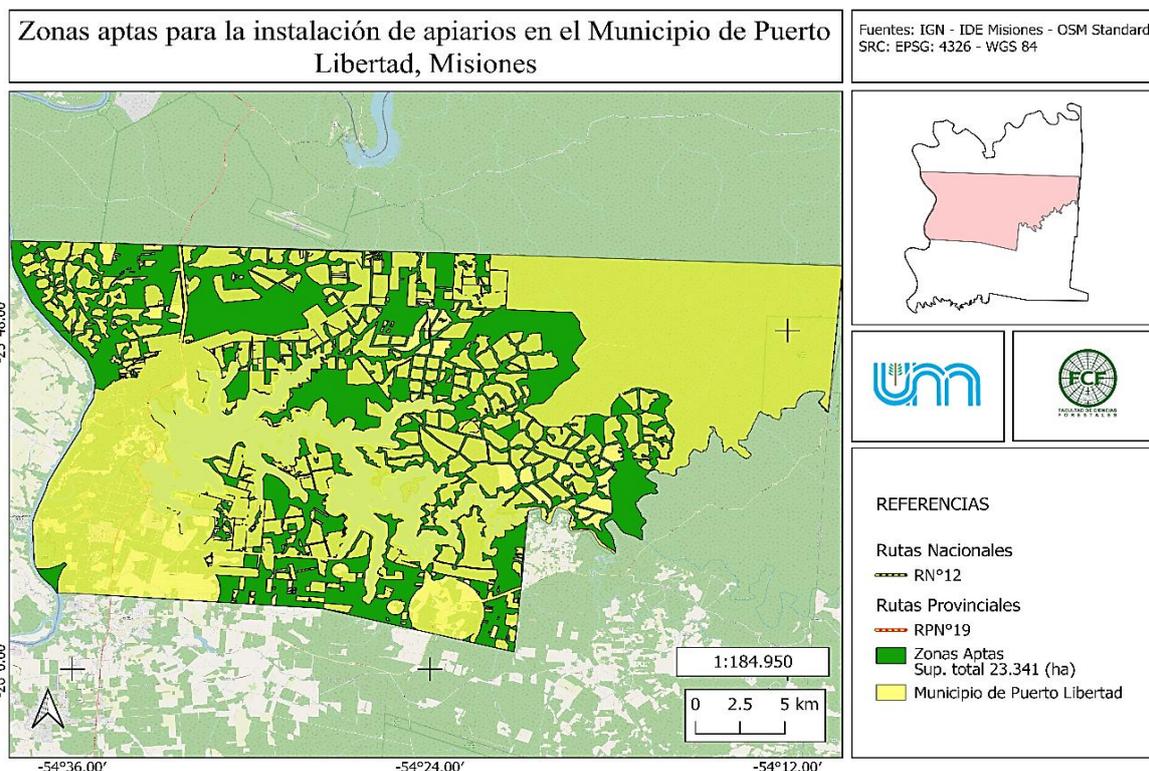


Figura 2. Zonas aptas para la instalación de apiarios en el Municipio de Puerto Libertad



4. CONCLUSIONES

El análisis realizado en el Municipio de Puerto Libertad permitió identificar que, de las 87.026 hectáreas totales, 63.685 hectáreas no son aptas para la instalación de apiarios debido a restricciones legislativas o usos del suelo. Sin embargo, se determinaron 23.341 hectáreas como aptas para esta actividad, representando ésta el 26,82 % del total del área bajo estudio.

La metodología empleada resultó efectiva para la identificación de estas zonas, permitiendo llevar a cabo los mapas temáticos propuestos. Este enfoque no solo facilita la planificación y optimización de la producción apícola, sino que también asegura un uso sostenible y adecuado del territorio disponible.

5. LITERATURA CITADA

- BALDI CORONEL, B. 2010. La miel. Una mirada científica. Editorial de la UNER. Paraná, Entre Ríos, Argentina. 1°ed. 232pp. ISBN: 978-950-698-252-2
- CABRERA, M. 1976. Territorios fitogeográficos de la República Argentina. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería: 2-85 Acmé. Buenos Aires. Segunda Edición.
- CARVAJAL, L.V. 2020. Importancia de las Abejas como polinizadores. Departamento de Biología. Escuela Politécnica Nacional. Repositorio Digital EPN. Extraído el sábado 14 de septiembre de 2024, de: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21021>
- GARTLAND, H.M. 2008. Textos de Dendrología. Cátedra de Dendrología. Editorial Universitaria de Misiones. Posadas, Misiones.
- GIRAUDO, A.R.; POVEDANO H.; BELGRANO J.M.; KRAUCZUK, E.; PARDIÑAS, U.; MIQUELARENA, A.; LIGIER, D.; BALDO, D.; CASTELINO, M. 2003. Biodiversity Status of the Interior Atlantic Forest of Argentina. Pp 160-180 en GALINDO-LEAL C. and GUSMÃO CÂMARA I. (eds.). The Atlantic Forest of South America. Biodiversity status, Threats, and Outlook. Island Press, Washington DC.
- LEZZI, M.E. 2019. Efectos de las plantaciones forestales en la diversidad y composición de los ensambles de mamíferos de pastizal y de bosque del Noreste de Argentina. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área Ciencias Biológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires.
- MELÉNDEZ RAMÍREZ, V.; CHABLÉ SANTOS, J.; SELÉM SALAS, C. 2020. Polinización y polinizadores amenazados en desaparecer. Bioagrociencias 13(2): 109 - 119.
- MUÑOZ, C.A. 2007. Relación entre la superficie de distintas coberturas vegetales y el Índice de Vegetación Normalizado con el rendimiento melífero de apiarios del centro de la provincia de Buenos Aires. Trabajo Final de Especialista de la Universidad de Buenos Aires, en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica aplicados al estudio de los recursos naturales y la producción agropecuaria. Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/especializacion/20-18munozcarlosalberto.pdf>
- OLLERTON, J. 1999. La evolución de las relaciones polinizador-planta en los artrópodos. Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa 26: 741-758.
- ROSETE, F.; BOCCO, G. 2003. Los Sistemas de información Geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. Gaceta Ecológica 68: 43-54. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Distrito Federal, México.
- SEELEY, T.D. 1992. Honeybee Ecology: A Study of Adaptation in Social Life. Princeton University Press. 216 p.
- VIDES BORRELL, E.; VANDAME, R. 2012. Pecoreo de abejas *Apis mellifera* en flores de soya *Glycine max*. Reporte Técnico. El Colegio de la Frontera Sur Departamento de Agricultura, Sociedad y Ambiente. Chiapas, México. Disponible en: https://www.apiservices.biz/documents/articulos-es/pecoreo_de_apis_mellifera_flores_soya.pdf
- VILLAFILA, E.; WYSS, V.F.; FRYDENLUND, R. 2007. Manual Técnico Apicultura. Ministerio del Agro y la Producción; Misiones Siembra. Apicultura Curso a distancia para productores misioneros. Posadas, Misiones.



ABUNDANCIA Y MONITOREO DE *Lactarius deliciosus* EN UN PINAR EXPERIMENTAL DE MISIONES: INTEGRACIÓN ÍNDICE DE HUMEDAD NORMALIZADA Y VARIABLES METEOROLÓGICAS

Santiago A. MARTÍNEZ^{1,2}; Andrés. A. L. LINDAO¹; Débora S. CARDOZO¹

RESUMEN

Lactarius deliciosus es un hongo micorrízico clave en ecosistemas forestales, cuya abundancia depende de múltiples factores ecológicos y edáficos. Este estudio se desarrolló en un pinar experimental de Eldorado, Misiones, donde se evaluó la relación entre la abundancia de *L. deliciosus*, el Índice de Humedad Normalizada (NDMI) y variables climáticas como temperaturas máximas y mínimas. Se establecieron 10 parcelas de 10 m² en distintos ambientes (pinar, sotobosque y tacuaral), registrando fructificaciones entre marzo y agosto de 2022–2025. Los resultados muestran que NDMI presenta una relación positiva pero débil con la abundancia del hongo ($R^2 = 0,034$ a $0,132$), indicando que la humedad superficial no es el único factor determinante. La inclusión de variables climáticas en modelos combinados aumentó la capacidad explicativa ($R^2 \approx 0,35$), sugiriendo que temperatura, precipitación y microcondiciones locales modulan significativamente la distribución de *L. deliciosus*. Estos hallazgos confirman que su abundancia depende de interacciones complejas entre factores edáficos, climáticos y ecológicos, y resaltan la necesidad de enfoques multidimensionales que integren teledetección de alta resolución y características locales para orientar estrategias de conservación y manejo sostenible de los hongos micorrízicos en ambientes forestales.

Palabras clave: *Teledetección, micología, datos estadísticos*

1. INTRODUCCIÓN

Los hongos del género *Lactarius*, y en particular *Lactarius deliciosus*, desempeñan un papel ecológico importante en los ecosistemas forestales, participando en interacciones micorrízicas que favorecen la nutrición de las plantas y la dinámica del suelo. Comprender los factores que determinan su distribución y abundancia es crucial para la conservación de estos ecosistemas y el manejo sostenible de los recursos fúngicos.

Erruvidarte y Martínez (2024) analizaron la relación entre índices de teledetección, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Humedad Normalizada (NDMI), y la abundancia de *L. deliciosus* en distintos ambientes: Tacuaral, pinar y sotobosque. Los resultados mostraron que ambos índices presentan correlaciones débiles con la presencia y cantidad del hongo. Aunque en el Tacuaral se observó una ligera tendencia positiva del NDVI y NDMI con la abundancia de *L. deliciosus*, la dispersión de los datos sugiere que estos índices no capturan completamente los factores que determinan su distribución. Estudios previos señalan que la calidad del suelo y la composición de la hojarasca pueden ser factores más determinantes (Manrique, 1999; Laiho, 1970; Hering, 1966; Khanmohammadi et al., 2015).

Estos hallazgos resaltan la necesidad de enfoques multidimensionales que integren variables edáficas, climáticas y ecológicas, junto con técnicas de teledetección de mayor resolución, para comprender mejor los determinantes de la abundancia de *L. deliciosus*. Este trabajo se basa en estos antecedentes para profundizar en el análisis de la relación entre índices de vegetación y humedad y la distribución de este hongo en distintos ambientes forestales.

¹ Facultad de Ciencias Forestales – UNaM, Bertoni 124, Eldorado, Misiones, Argentina

² Autor de correspondencia: +54 3751 – 557878; daron07mar@gmail.com



2. MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se desarrolló en un pinar experimental abandonado de 15 años, ubicado en Eldorado, Misiones, Argentina (coordenadas: $-26,415787^\circ$, $-54,651553^\circ$) (Figura 1A), con una superficie aproximada de 1 ha. El sotobosque estaba dominado por helechos y *Piper sp.*, y el área estaba delimitada al norte por un bosque secundario y al sureste por un tacuaral (*Phyllostachys sp.*). Este trabajo constituye una segunda etapa de la investigación de (Erruidarte y Martínez 2024), cuyo objetivo fue afinar la estimación de la incidencia poblacional de *L. deliciosus* integrando datos de NDMI, registros climáticos semanales y nuevos conteos de fructificaciones.

Diseño de muestreo y registro de fructificaciones

En la primera etapa del estudio (2022–2023), se establecieron 10 parcelas de 10 m² distribuidas dentro de un pinar que se los sectorizo según las especies que se encontraban a su alrededor bosque secundario y tacuaral, siguiendo un diseño de muestreo aleatorio simple (Thompson, 2012). En cada parcela se contabilizó mensualmente la abundancia de fructificaciones de *L. deliciosus* dentro de un subcuadro central de 1 m², entre los meses de marzo y agosto, evitando el periodo estival por la ausencia de fructificación de la especie (Niveiro et al., 2009).

En la segunda etapa (2025), se repitió el muestreo en las mismas parcelas, incorporando registros de temperatura media semanal (\bar{T}) para su análisis conjunto con los valores de NDMI.

Imágenes satelitales y cálculo de NDMI

Se utilizaron imágenes Sentinel-2 L2A, seleccionadas con un nivel de nubosidad inferior al 10% y cobertura completa del área de estudio, siguiendo recomendaciones para minimizar interferencias atmosféricas (Sacristán-Romero, 2006). El NDMI se calculó a partir de las bandas NIR (B8, 842 nm) y SWIR (B11, 1610 nm) con resolución espacial de 20 m, mediante la ecuación propuesta por Gao (1996) y modificado según los parámetros de (Erruidarte y Martínez (2024) (Figura 1B).

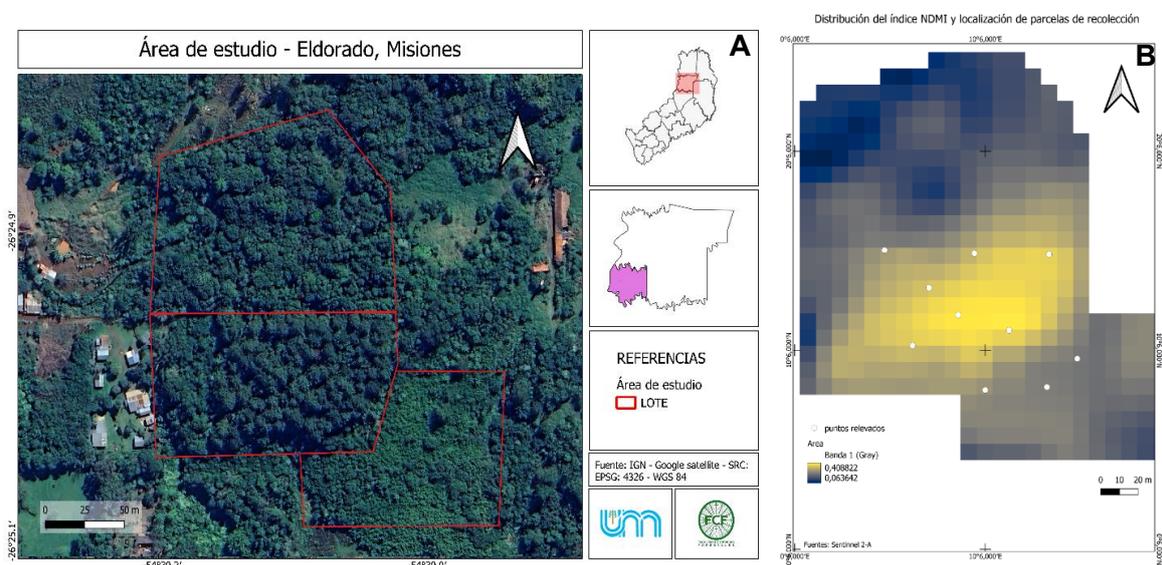


Figura 1. A) Ubicación del área de trabajo; B) Índice NDMI del área de trabajo

Para reducir el desajuste entre la escala de muestreo en campo y la resolución espacial de las imágenes, se extrajo la mediana de un kernel de 3×3 píxeles centrado en la ubicación de cada parcela, excluyendo píxeles clasificados como nubes, sombras o áreas sin datos (EOS, s.f.).

Datos meteorológicos

Los datos climáticos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana, utilizando registros



horarios promediados para calcular \bar{T} diarias de los días de estudio. Considerando posibles desfases en la respuesta biológica de los macromicetos respecto a las condiciones climáticas (Hering, 1966; Laiho, 1970; Peredo et al., 1983), se incluyeron variables con desfases de 1 a 6 días posterior a la fecha de adquisición de la imagen satelital.

Integración de datos y análisis estadístico

Para cada parcela se tomó de referencia el mismo día según Erruvidarte y Martínez (2024) considerando la referencia la abundancia de *L. deliciosus*, el valor de NDMI, la temperatura máxima y mínima del día en el que se obtuvo la imagen y el día en que se registró la abundancia.

Se analizaron las relaciones entre variables mediante coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, seleccionando el estadístico según el cumplimiento de supuestos de normalidad (Zar, 1999). Se aplicaron modelos de regresión lineal simple y múltiple para evaluar la influencia de NDMI, \bar{T} sobre la abundancia de *L. deliciosus*, considerando diferentes desfases temporales. Asimismo, se utilizó la función de correlación cruzada (CCF) para identificar el desfase con mayor asociación entre variables (Box et al., 2016).

La validación de los modelos se realizó utilizando los datos de 2025 como conjunto de prueba externa, calculando el error absoluto medio y verificando si los valores observados se encontraban dentro de los intervalos de predicción al 95%.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis integró los datos históricos de Erruvidarte y Martínez (2024) con los registros de la temporada actual, considerando la abundancia total de *L. deliciosus* por parcela y su relación con NDMI y variables climáticas. Esto permitió evaluar tanto la relación simple con la humedad superficial como la influencia de factores ambientales adicionales.

Se observa que los datos históricos en los ambientes Tacuaral, pinar y sotobosque, considerando la parcela total (Gráfico 1A), muestran que NDMI mantiene una relación positiva pero débil con la abundancia de *L. deliciosus*. El valor de $R^2 = 0,034$ indica que solo una mínima fracción de la variabilidad de la abundancia puede explicarse por NDMI, lo que confirma que la humedad superficial, aunque relevante, no es el único factor determinante de la distribución de la especie (Erruvidarte y Martínez, 2024).

Para la temporada actual, los registros se consolidaron por parcela y el análisis se centró en NDMI como variable principal, complementada con variables climáticas (temperatura máxima y mínima). El gráfico 1B muestra la relación entre NDMI y la abundancia total de *L. deliciosus* por parcela, integrando los datos actuales con los históricos. La línea de regresión evidencia que la tendencia positiva sigue siendo débil, pero el $R^2 = 0,132$ indica que la inclusión de los datos actuales aumenta ligeramente la capacidad de NDMI para explicar la variabilidad observada.

La representación del modelo combinado, que integra el NDMI y la temperatura mínima para predecir la abundancia de *Lactarius deliciosus* (Gráfico 1C), evidencia que la incorporación de factores climáticos mejora la capacidad explicativa del modelo. El coeficiente de determinación ($R^2 = 0,283$) indica que la temperatura mínima contribuye de manera moderada a explicar la variabilidad en la distribución y abundancia del hongo. No obstante, la dispersión de los datos sugiere que las microcondiciones locales siguen siendo factores determinantes en la presencia de la especie.

Estos resultados muestran que la abundancia de *L. deliciosus* depende de múltiples factores ecológicos y edáficos. La débil relación de NDMI con la abundancia en los datos históricos coincide con estudios previos que resaltan la influencia de la calidad del suelo y la composición de la hojarasca en la distribución de hongos micorrícicos (Manrique, 1999; Laiho, 1970; Hering, 1966; Khanmohammadi et al., 2015). La mejora observada al integrar variables climáticas y los datos actuales sugiere que las condiciones ambientales locales, especialmente temperatura y humedad, modulan la abundancia de *L. deliciosus*.



En síntesis, estos hallazgos confirman la necesidad de un enfoque multidimensional que combine NDMI, variables climáticas y características edáficas y ecológicas, para comprender mejor los determinantes de la abundancia de *L. deliciosus* y orientar estrategias de conservación y manejo sostenible en ambientes forestales (Erruvidarte y Martínez, 2024; Khanmohammadi et al., 2015).

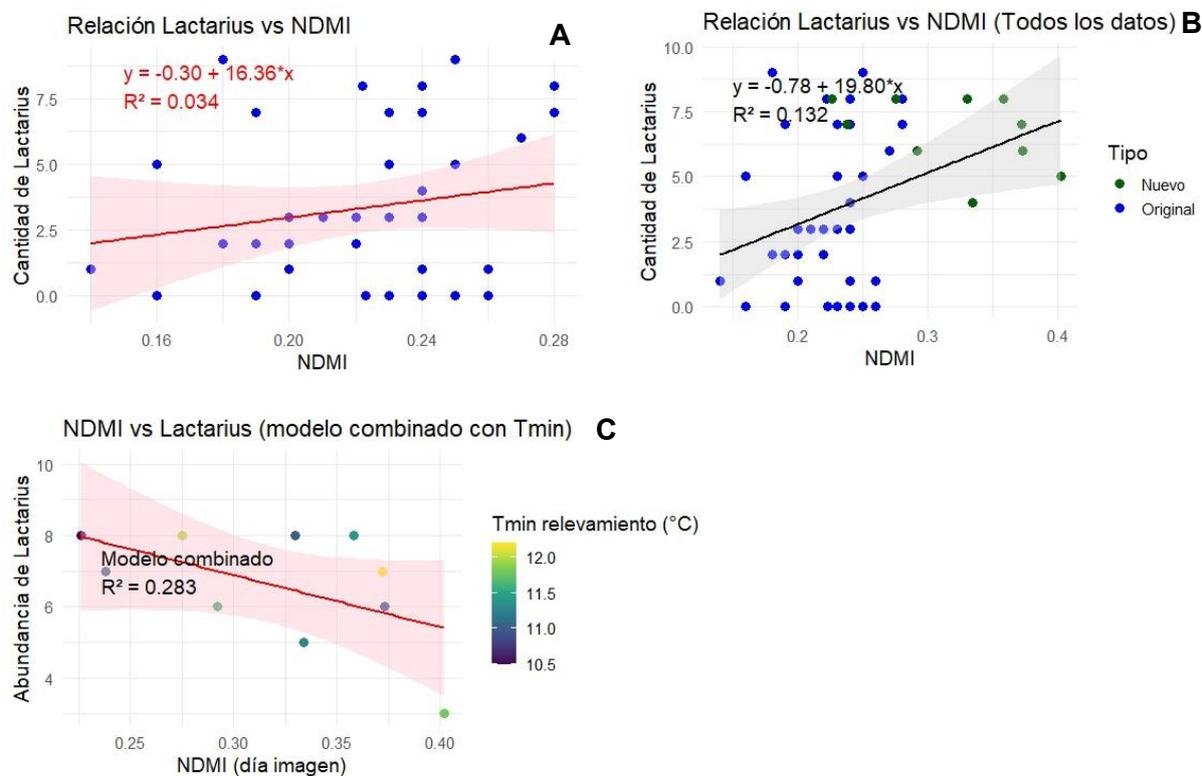


Gráfico 1. A) Regresión y correlación del primer muestreo (datos recopilados de (Erruvidarte y Martínez 2024); B) regresión y correlación de los datos anterior y datos actuales; C) relación entre NDMI y temperaturas máximas y mínimas

4. CONCLUSIONES

La integración de los datos históricos de Erruvidarte y Martínez (2024) con los registros actuales permitió evaluar la capacidad de NDMI y variables climáticas para predecir la abundancia de *Lactarius deliciosus*. Los resultados muestran que, aunque la relación de NDMI con la abundancia sigue siendo débil, la inclusión de datos adicionales y variables climáticas mejora ligeramente la explicación de la variabilidad observada (R^2 aumentó de 0,034 a 0,132 para NDMI, y hasta ~0,35 al considerar factores climáticos). Esto indica un avance respecto al trabajo previo, aunque la predicción aún es limitada.

Los hallazgos sugieren que la abundancia de *L. deliciosus* depende de múltiples factores ecológicos y edáficos, y que NDMI por sí sola no es suficiente para predecirla con precisión. Para mejorar la capacidad predictiva, futuros estudios podrían considerar la incorporación de variables adicionales relacionadas con la calidad del suelo, la composición de la hojarasca, y microcondiciones locales, así como un muestreo más extenso con mayor número de parcelas y registros temporales más detallados.

En síntesis, este trabajo confirma parcialmente los resultados previos, aporta una mejora moderada en la explicación de la variabilidad y abre la puerta a estudios futuros más integrales que permitan comprender con mayor exactitud los determinantes de la abundancia de *Lactarius deliciosus* en ambientes forestales.

5. LITERATURA CITADA

EOS. (s.f.). Sentinel-2 data access and processing guidelines. Recuperado de <https://eos.com>



- 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. *Actas de las XXXVIII Jornadas Forestales*. Recuperado de https://www.jornadasforestales.com.ar/jornadas/2024/post_Erruvidarte-Martinez_Analisis_abundancia_Lactarius-deliciosus.pdf
- Gao, B.C. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58(3): 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- HERING, T. F. 1966. The terricolous higher fungi of four lake district woodlands. *Transactions of the British Mycological Society* 49: 369–383.
- KHANMOHAMMADI, F.; HOMAEE, M.; NOROOZI, A. A. 2015. Soil moisture estimating with NDVI and land surface temperature and normalized moisture index using MODIS images. *Journal of Soil and Water Resources Conservation* 4: 37–45.
- LAIHO, O. 1970. *Paxillus involutus* as a mycorrhizal symbiont of forest trees. *Acta Forestalia Fennica*, 79: 1–35.
- MANRIQUE, E. G. 1999. Índice de vegetación. Aplicación del NDVI. En S. Castaño Fernández & A. Quintinilla Roedas (Eds.), *Teledetección: Avances y aplicaciones*. VIII Congreso Nacional de Teledetección (pp. 217–219). Albacete, España: Universidad de Málaga.
- NIVEIRO, N.; LÓPEZ, A.; FERNÁNDEZ, J. 2009. Fenología de fructificación de *Lactarius deliciosus* en plantaciones de pino en Argentina. *Revista de Micología* 31(2): 45–52.
- PEREDO, F.; MARTÍNEZ, L.; GÓMEZ, R. 1983. Influencia de factores climáticos en la aparición de fructificaciones de hongos forestales. *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica* 21: 77–88.
- SACRISTÁN-ROMERO, F. 2006. La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Quivera Revista de Estudios Territoriales* 8(1): 315–356. <https://quivera.uaemex.mx/article/view/10575>
- THOMPSON, S. K. 2012. *Sampling* (3rd ed.). Wiley.
- ZAR, J. H. 1999. *Biostatistical analysis* (4th ed.). Prentice Hall.



ORGANIZAN



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria
Argentina



COLABORAN

