

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**DESARROLLO DE MODELOS DE ESTIMACIÓN DE VARIABLES
FORESTALES EN SISTEMA SILVOPASTORIL UTILIZANDO MÉTRICAS
LIDAR**

por

**Rodrigo Agustín BLUM LECCHINI
Juan Ignacio SANTÍN CORVO**

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2026**

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No comercial – Compartir igual**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director:

Ing. Agr. (Mag.) Iván Rizzo

Codirector:

Ing. Agr. (Dr.) Jaime González

Tribunal:

Ing. Agr. (Mag.) Iván Rizzo

Ing. Agr. (Mag.) Andrés Baietto

Ing. Agr. (Mag.) Valentina Benítez

Fecha:

8 de julio de 2026

Estudiante:

Rodrigo Agustín Blum Lecchini

Juan Ignacio Santín Corvo

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este trabajo.

En primer lugar, agradecemos profundamente a nuestro tutor de tesis, Iván Rizzo, por su compromiso, orientación constante y valiosos aportes en cada etapa del proceso. Su acompañamiento fue fundamental para el desarrollo de esta investigación.

Agradecemos también a Sofía Arambillete por su colaboración en las tareas de medición en campo, contribuyendo de manera clave al avance del trabajo práctico.

A la Fuerza Aérea Uruguaya, por haber facilitado la realización del vuelo con dron equipado con LiDAR, brindando el acceso a datos esenciales para esta tesis.

Al Departamento Forestal, por el apoyo técnico e institucional brindado, sin el cual muchas de las actividades desarrolladas no hubieran sido posibles.

Y a la Estación Experimental Bañado de Medina, por permitirnos la estadía y la ejecución del trabajo de campo en sus instalaciones.

A todos ellos, muchas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	7
RESUMEN	8
ABSTRACT.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. SISTEMAS AGROFORESTALES	11
1.2. SISTEMAS SILVOPASTORILES Y SU IMPORTANCIA EN URUGUAY	11
1.2.1. Superficie ocupada por sistemas silvopastoriles en Uruguay	12
1.2.2. Diferencias entre sistemas forestales puros y sistemas silvopastoriles	13
1.2.3. Enfoque multifuncional de los SSP	14
1.2.4. Importancia de la sombra en SSP.....	14
1.3. ESTIMACIÓN DE VARIABLES FORESTALES: NECESIDADES Y ENFOQUES	15
1.4. SENSORAMIENTO REMOTO APLICADO A LA GESTIÓN DE RECURSOS FORESTALES	16
1.4.1. Tecnología LiDAR y su aplicación en sistemas productivos	16
1.4.2. Plataformas de relevamiento mediante tecnología LiDAR.....	17
1.4.3. Métricas derivadas del LiDAR y su utilidad forestal	17
1.4.4. Aplicaciones del LiDAR en sistemas forestales y silvopastoriles en Uruguay: avances y resultados relevantes	18
2. OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVO GENERAL	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3. MATERIALES Y MÉTODOS	20
3.1. ÁREA DE ESTUDIO	20
3.2. DATOS DE CAMPO Y DATOS LIDAR.....	22
3.2.1. Recolección de datos en campo.....	22
3.2.2. Relevamiento LiDAR y segmentación de copas	22
3.3. DESARROLLO, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DE MODELOS	23
3.4. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE TRATAMIENTOS	24
4. RESULTADOS.....	25

4.1. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE Ht Y DAP PARA EL ENSAYO CLONAL	25
4.1.1. Modelo de estimación de Ht	25
4.1.2. Modelo de estimación de DAP.....	26
4.2. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE Ht Y DAP PARA EL ENSAYO SEMINAL	28
4.2.1. Modelo de estimación de Ht	28
4.2.2. Modelo de estimación de DAP.....	30
4.3. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE Ht Y DAP	32
4.4. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE TRATAMIENTOS	33
4.4.1. Comparación estadística entre tratamientos del ensayo clonal	34
4.4.2. Comparación estadística entre tratamientos del ensayo seminal	35
5. DISCUSIÓN	36
5.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE Ht PARA LOS ENSAYOS CLONAL Y SEMINAL	36
5.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE DAP PARA LOS ENSAYOS CLONAL Y SEMINAL	37
5.3. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE TRATAMIENTOS	38
5.3.1. Ensayo clonal	38
5.3.2. Ensayo seminal.....	41
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	43
7. BIBLIOGRAFÍA.....	44

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla	Página
Tabla 1. <i>Tratamientos en ensayos de origen clonal y seminal</i>	21
Tabla 2. <i>Media y Desvío Estándar de las variables DAP y Ht con datos medidos a campo</i>	22
Tabla 3. <i>Resumen de resultados de los modelos de estimación de Ht y DAP en ambos ensayos</i>	32
Tabla 4. <i>Media y Desvío Estándar de las variables DAP y Ht por especie en ambos ensayos</i>	33
Tabla 5. <i>Comparación estadística entre tratamientos del ensayo clonal</i>	33
Tabla 6. <i>Comparación estadística entre tratamientos del ensayo seminal</i>	34

Figura	Página
Figura 1. <i>Mapa del área de estudio comprendido por los ensayos de origen clonal y seminal</i>	20
Figura 2. <i>Área de estudio comprendida por los ensayos de origen clonal y seminal discriminados por tratamientos</i>	21
Figura 3. <i>Gráfico del modelo de estimación de Ht en función del MDV max en ensayo clonal</i>	25
Figura 4. <i>Gráfico de correlación entre valores observados y predichos de Ht en ensayo clonal</i>	26
Figura 5. <i>Gráfico del modelo de estimación del DAP en función del MDV max en ensayo clonal</i>	27
Figura 6. <i>Gráfico de la correlación entre valores observados y predichos del DAP en ensayo clonal</i>	28
Figura 7. <i>Gráfico del modelo de estimación de Ht en función del MDV max en ensayo seminal</i>	29
Figura 8. <i>Gráfico de la correlación entre valores observados y predichos de Ht en ensayo seminal</i>	30
Figura 9. <i>Gráfico del modelo de estimación del DAP en función del MDV max en ensayo seminal</i>	31
Figura 10. <i>Gráfico de la correlación entre valores observados y predichos del DAP en ensayo seminal</i>	32

RESUMEN

Los sistemas silvopastoriles (SSP) constituyen una alternativa productiva que integra árboles, pasturas y ganado, generando beneficios tanto productivos como ambientales. En este contexto, la estimación precisa de variables forestales como la altura total (Ht) y el diámetro a la altura del pecho (DAP) resulta fundamental para la gestión y el monitoreo forestal. El uso de tecnologías de sensoramiento remoto, en particular el LiDAR aerotransportado, permite obtener estimaciones rápidas y precisas de estas variables a escala de árbol individual. El estudio se llevó a cabo en la Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurtt, en Cerro Largo, Uruguay, sobre ensayos clonales y seminales establecidos bajo régimen silvopastoril plantados con las especies *Eucalyptus grandis* W. Hill y *Eucalyptus dunnii* Maiden. Se seleccionaron y midieron en campo 96 árboles, midiendo Ht y DAP. Posteriormente, se realizó un vuelo con un sensor LiDAR Zenmuse L2 (DJI, Shenzhen, China) montado en un dron Matrice 350 (DJI, Shenzhen, China). A partir de la nube de puntos se generó un modelo digital de vegetación (MDV), del cual se extrajo la altura máxima (MDV máx) de cada árbol segmentado. Con esta información se ajustaron modelos lineales para la estimación de Ht y DAP, evaluando su desempeño mediante el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y validación cruzada leave-one-out (LOOCV). Los modelos desarrollados mostraron una alta capacidad predictiva. Para la estimación de Ht se obtuvieron valores de R^2 de 0,93 y 0,92 en los ensayos clonal y seminal, respectivamente, con un RMSE de 0,40 m en ambos casos. En el caso del DAP, los modelos alcanzaron R^2 de 0,73 (clonal) y 0,78 (seminal), con RMSE de 0,73 cm y 0,59 cm, respectivamente. Asimismo, se detectaron diferencias significativas entre tratamientos silvopastoriles, evidenciándose la influencia del espaciamiento y la disposición de las filas sobre el crecimiento de los árboles, el tratamiento con menor ancho de callejón (9 m) y fila triple presentó mayores valores de DAP y Ht tanto para clon como para semilla. También se observaron diferencias significativas entre los tratamientos con distinto ancho de callejón, en clonal se obtuvieron valores máximos de 8,28 cm de DAP y 8,94 m de Ht con anchos de 9 metros y mínimos de 5,05 cm DAP y 4,93 m Ht con anchos de 15 metros y en seminal máximos de 9,54 cm de DAP y 9,36 m de Ht con anchos de 9 metros y mínimos de 7,61 cm de DAP y 6,88m de Ht con anchos de 15 metros. En conclusión, el uso de LiDAR aerotransportado demostró ser una herramienta eficiente y precisa para la estimación de variables forestales a nivel de árbol individual en SSP. Los modelos obtenidos permiten reducir tiempos y costos asociados a los inventarios forestales tradicionales, contribuyendo a mejorar la planificación y la toma de decisiones.

Palabras clave: Eucalyptus spp., sistemas silvopastoriles, sensoramiento remoto, modelo digital de vegetación, variables forestales

ABSTRACT

Silvopastoral systems (SPS) are a productive alternative that integrates trees, pastures, and livestock, generating both productive and environmental benefits. In this context, the accurate estimation of forest variables such as total height (Ht) and diameter at breast height (DBH) is essential for forest management and monitoring. The use of remote sensing technologies, particularly airborne LiDAR, enables rapid and accurate estimation of these variables at the individual tree level. The study was conducted at the Prof. Bernardo Rosengurtt Experimental Station in Cerro Largo, Uruguay, on clonal and seed-origin trials established under a silvopastoral regime with *Eucalyptus grandis* W. Hill and *Eucalyptus dunnii* Maiden plantations. A total of 96 trees were selected and measured in the field, recording Ht and DBH. Subsequently, a LiDAR survey was performed using a Zenmuse L2 sensor (DJI, Shenzhen, China) mounted on a Matrice 350 drone (DJI, Shenzhen, China). From the point cloud, a digital vegetation model (DVM) was generated, from which the maximum height value (maximum DVM) of each segmented tree was extracted. Linear models were then fitted to estimate Ht and DBH, and their performance was evaluated using the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and leave-one-out cross-validation (LOOCV). The developed models showed high predictive capacity. For Ht estimation, R^2 values of 0.93 and 0.92 were obtained for the clonal and seed-origin trials, respectively, with an RMSE of 0.40 m in both cases. For DBH estimation, the models achieved R^2 values of 0.73 (clonal) and 0.78 (seed-origin), with RMSE values of 0.73 cm and 0.59 cm, respectively. Significant differences were also detected among silvopastoral treatments, demonstrating the influence of spacing and row arrangement on tree growth. Treatments with narrower alley widths (9 m) and triple-row arrangements showed the highest DBH and Ht values in both clonal and seed-origin trials. Significant differences were also observed between treatments with different alley widths. In the clonal trial, maximum values of 8.28 cm DBH and 8.94 m Ht were recorded under 9 m alley widths, while minimum values of 5.05 cm DBH and 4.93 m Ht were observed under 15 m alley widths. In the seed-origin trial, maximum values reached 9.54 cm DBH and 9.36 m Ht under 9 m alley widths, whereas minimum values of 7.61 cm DBH and 6.88 m Ht were recorded under 15 m alley widths. In conclusion, airborne LiDAR proved to be an efficient and accurate tool for estimating forest variables at the individual tree level in SPS. The developed models reduce the time and costs associated with traditional forest inventories, contributing to improved planning and decision-making.

Keywords: *Eucalyptus* spp., silvopastoral systems, remote sensing, digital vegetation model, forest variables

1. INTRODUCCIÓN

La forestación con fines comerciales en Uruguay comenzó a adquirir relevancia a partir de 1968, con la promulgación de la primera Ley Forestal (Ley n° 13.723, 1968). Esta legislación definía, de forma general, el concepto de bosque, los tipos de terrenos aptos para forestación y establecía la Dirección General Forestal (DGF) como el organismo responsable de su aplicación y seguimiento (Ley n° 13.723, 1968). Antes de la implementación de dicha ley, los bosques naturales cubrían aproximadamente medio millón de hectáreas, mientras que los bosques plantados con fines productivos se concentraban principalmente en el norte del país. Las estadísticas de la época estimaban 455.523 hectáreas de bosque nativo y 143.115 hectáreas de bosques cultivados (Porcile Maderni, 2007).

Posteriormente, en 1987, se promulgó la segunda Ley Forestal (Ley n° 15.939, 1987), la cual complementó y fortaleció la normativa anterior mediante la incorporación de incentivos tributarios y financieros, impulsando significativamente el desarrollo del sector forestal en Uruguay. Además, esta ley introdujo medidas orientadas a la preservación y manejo sostenible del bosque nativo, que en aquel momento presentaba altos niveles de degradación debido a su uso intensivo como fuente de leña y madera (Ley n° 15.939, 1987). También estableció criterios técnicos y territoriales para ordenar la expansión forestal, como la exigencia de una superficie mínima de 10 hectáreas, el uso exclusivo de suelos declarados de prioridad forestal (que abarcan alrededor de 4 millones de hectáreas), la selección de especies autorizadas y la presentación obligatoria de un proyecto ante la DGF para su aprobación. Estas disposiciones permitieron consolidar una planificación eficiente y sostenible del sector a largo plazo.

Según datos de la DGF (2024), la superficie total de Uruguay es de unas 17.502.000 ha, con una superficie total de bosques de 2.009.169 ha (11,5%), de las cuales 1.161.851 ha corresponden a superficie de bosque plantado (6,6%) y 847.181 ha corresponden a bosque nativo (4,8%).

En relación con la distribución por especies en los bosques plantados, las más representadas son: *Eucalyptus grandis* (31,6 %), *Eucalyptus dunnii* (28 %), *Pinus elliottii* y *Pinus taeda* (14,3 %), y *Eucalyptus globulus* (10,6 %) (DGF, 2024). Tanto *E. dunnii* como *E. globulus* tienen como principal destino productivo la elaboración de pulpa de celulosa, *P. elliottii* y *P. taeda* son plantados con el fin de obtener madera sólida y *E. grandis* presenta versatilidad dado que puede plantarse con fines celulósicos y de aserrío.

El sector forestal de Uruguay, que abarca mayormente la producción de celulosa y madera aserrada, se ha consolidado como uno de los principales rubros de exportación del país. En 2022, las ventas al exterior alcanzaron un máximo histórico

cercano a USD 2.500 millones, impulsadas por una evolución sostenida durante los últimos 15 años (Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social [CERES], 2023). La pulpa de celulosa representa el principal producto de exportación, con una participación del 76 % del total, y por su parte el subsector de la madera sólida, que incluye madera en rollo, aserrada, tableros y chips, representó el 23 % del valor total exportado por el complejo forestal en ese mismo año (CERES, 2023).

La expansión forestal en Uruguay, orientada principalmente a los suelos de prioridad forestal, ha generado una transformación significativa en el uso del suelo rural, reemplazando antiguas áreas dedicadas a la ganadería o la agricultura tradicional. Paralelamente, el país ha fortalecido su marco legal y ambiental para asegurar un desarrollo forestal sostenible, alcanzando altos niveles de certificación bajo estándares internacionales como FSC (Forest Stewardship Council) y PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification) en el 90% de las plantaciones, lo que respalda prácticas responsables de manejo y conservación de los ecosistemas, asegurando el ingreso a mercados con altos estándares ambientales (Uruguay XXI, 2025).

1.1. SISTEMAS AGROFORESTALES

Los sistemas agroforestales (SAF) son formas de uso y manejo sostenible del suelo que integran, en una misma unidad de terreno, componentes agrícolas, forestales y/o pecuarios, de manera simultánea o secuencial. Estos sistemas buscan optimizar los beneficios económicos, ecológicos y sociales, promoviendo la biodiversidad, la conservación del suelo, la mejora de la fertilidad y la resiliencia de los ecosistemas. A diferencia de los sistemas agrícolas convencionales, los SAF tienden a imitar la estructura y las funciones de los ecosistemas naturales, lo que favorece una producción más sostenible y mejor adaptada al cambio climático (Montagnini & Nair, 2004).

1.2. SISTEMAS SILVOPASTORILES Y SU IMPORTANCIA EN URUGUAY

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una modalidad de manejo agroforestal que integra, de forma planificada, componentes forestales, forrajeros y pecuarios en una misma unidad productiva. Esta integración busca generar interacciones ecológicas y productivas positivas entre los árboles, las pasturas y los animales, optimizando el uso del suelo y promoviendo sistemas más sostenibles. A través de esta sinergia, los árboles aportan múltiples beneficios como sombra, alimento, protección contra la erosión y mejora de la fertilidad del suelo, mientras que los animales contribuyen con la fertilización orgánica y el control de la vegetación (Ibrahim et al., 2006; Murgueitio et al., 2011).

En un trabajo de Huertas et al. (2021) se señala que la incorporación de *Eucalyptus spp.* en pastizales uruguayos no afectó negativamente la ganancia de peso

ni el bienestar de ganado vacuno de razas europeas. Los SSP evaluados resultaron comparables a los sistemas abiertos en términos productivos, a la vez que ofrecieron un entorno más favorable para el bienestar animal. Además, la producción forestal representa una fuente adicional de ingresos que contribuye a la sostenibilidad económica de los productores.

Según José Dutra, presidente de la Sociedad Uruguaya de Silvopastoreo, se estima que los SSP en Uruguay pueden generar entre USD 100 y 120 por hectárea al año por la ganadería, y aproximadamente USD 350 por hectárea al año por la producción forestal, considerando un ciclo productivo promedio de 15 años (Alamón, 2024). En este sentido, los SSP se presentan como una alternativa económicamente viable al combinar ingresos anuales provenientes de la actividad ganadera con retornos de mayor escala a largo plazo derivados de la forestación.

1.2.1. Superficie ocupada por sistemas silvopastoriles en Uruguay

Según el proyecto URU/18/G31, coordinado por la Dirección Nacional de Cambio Climático (Ministerio de Ambiente) junto con MGAP y PNUD, en 2020 se identificaron 6.392 hectáreas efectivas bajo SSP, distribuidas en 39 predios en todo el país (Sancho et al., 2021).

En el trabajo de Sancho et al. (2021) se distribuyen los SSP en tres regiones principales:

Sur-Sureste (5.066,25 ha), Centro-Sur (976,34 ha) y Norte (349,98 ha), representando aproximadamente el 0,4 % de la superficie productiva del país (Sancho et al., 2021; Viñoles et al., 2022). A futuro, se estima que los SSP alcancen un potencial de 30.000 ha para el año 2030 (Rizzotto, 2023).

Las especies que predominan en los SSP pertenecen al género *Eucalyptus*, predominando *E. globulus* en la zona sur-sureste y *E. grandis* en el norte. En un 87 % de los casos, se observa la disposición en hileras dobles o triples separadas por callejones de 6 a 8 m de ancho, aunque en predios más jóvenes los callejones pueden medir entre 12 y 20 m, lo cual favorece la productividad forrajera (Sancho et al., 2021).

En la actualidad, la implantación de SSP en Uruguay ha evolucionado hacia diseños espaciales estratégicos, que incorporan árboles en distribuciones que permiten la entrada de luz y reducen la competencia con las pasturas por recursos hídricos y nutrientes. Estos diseños tienden a mantener una producción forrajera estable y cargas animales eficientes, al tiempo que logran una productividad forestal de nivel intermedio (Schinato, 2022).

1.2.2. Diferencias entre sistemas forestales puros y sistemas silvopastoriles

Las plantaciones bajo sistemas forestales puros suelen plantarse en alta densidad y presentar un marco regular (por ejemplo, 1.000–1.200 plantas/ha con distancias de 3×3 m a 4×3 m), optimizadas para producción maderera (Cardozo Olivera, 2023; Nessi Darreche & Lustemberg Martínez, 2022; Yussim Broder, 2013).

En contraste, los SSP emplean densidades más bajas (~150–625 plantas/ha) y distribuciones en hileras con callejones forrajeros entre ellas, permitiendo la integración de pasturas, ganado y árboles (Frey et al., 2009; Viñoles et al., 2022). Este diseño favorece la incidencia lumínica hacia el pasto y reduce la competencia por recursos entre árboles y forraje (Frey et al., 2009; García Pintos Martínez, 2021).

En los SSP, el diseño y manejo de los callejones (espacios entre hileras de árboles) constituye un componente fundamental para lograr una integración eficiente entre los componentes forestal, forrajero y pecuario. Estos callejones suelen presentar anchos variables, que van desde 8 hasta 30 metros, y orientaciones estratégicas, con el objetivo de maximizar la radiación solar disponible para el crecimiento del forraje, reducir la competencia lumínica y facilitar las labores mecanizadas, tales como el pastoreo rotativo, la fertilización, el control de malezas y las podas mecanizadas (Frey et al., 2009; Sancho et al., 2021; Vieira Junior et al., 2022). A diferencia de los sistemas forestales puros, en los cuales los caminos son elementos secundarios y el foco está exclusivamente en la producción maderera, en los SSP los callejones cumplen una función estructural y operativa central, ya que permiten una adecuada espacialización del ganado y favorecen la productividad y persistencia de las pasturas incluso bajo la copa de los árboles (Boscana Goires, 2019; Fedrigo et al., 2018).

Diversas investigaciones han demostrado que los callejones, en particular de especies como *Eucalyptus spp.*, tiene un efecto significativo sobre la productividad del forraje, el microclima y el bienestar animal (Benítez et al., 2019; de Macêdo Carvalho et al., 2024; Santos et al., 2018). En SSP con *Eucalyptus urograndis* y *Brachiaria brizantha*, por ejemplo, se ha observado que un espaciamiento de 22 metros entre hileras permite un mayor rendimiento forrajero por hectárea sin afectar negativamente la ganancia diaria de peso del ganado (Santos et al., 2018). Asimismo, se ha reportado que separaciones de hasta 28 metros optimizan la disponibilidad de luz, mejoran el contenido proteico del forraje y aumentan su valor nutritivo sin comprometer su digestibilidad (de Macêdo Carvalho et al., 2024).

En Uruguay, el estudio del microclima en SSP ha mostrado que la orientación de las hileras de *Eucalyptus* impacta significativamente en la disponibilidad de luz, la temperatura del suelo y el confort térmico del ganado. Simulaciones de sombra realizadas por Benítez et al. (2019) evidenciaron que las hileras orientadas de este a oeste (E–O) generan hasta un 63 % de sombra al mediodía, lo cual puede disminuir la radiación solar directa y atenuar el estrés térmico, pero también limitar el crecimiento del sotobosque. En contraste, las hileras orientadas de norte a sur (N–S) mostraron un

33 % de sombra, lo que permite una distribución lumínica más uniforme a lo largo del año y mejores condiciones para la productividad forrajera. Estos resultados sugieren que, en el contexto uruguayo, el diseño del sistema debe equilibrar sombra y luz según los objetivos productivos y de bienestar animal.

1.2.3. Enfoque multifuncional de los SSP

A diferencia de los sistemas forestales puros, cuyo objetivo principal es la producción maderera, los SSP están diseñados con un enfoque multifuncional, que integra la producción forestal con la producción ganadera y forrajera (Rivera et al., 2023; Sancho et al., 2021). En este tipo de sistemas, el componente herbáceo, compuesto por pasturas naturales, mejoradas o implantadas, tiene un rol central, ya que es la principal fuente de alimentación para el ganado destinado a la producción de carne.

Además del pastoreo directo, el componente forrajero en los SSP puede destinarse a la elaboración de reservas forrajeras, como heno o fardos, utilizadas estratégicamente durante períodos de déficit alimenticio, contribuyendo a la estabilidad de la producción animal y a la diversificación productiva del sistema (Fedrigo et al., 2018). Esto convierte al componente forrajero en un producto más del sistema, con valor económico directo.

El diseño del sistema, incluyendo el manejo de los callejones y la selección de especies forestales menos competitivas, permite mantener la productividad forrajera aun en presencia del componente arbóreo, especialmente cuando se controla la densidad y disposición espacial de los árboles (Dunn et al., 2021; Santos et al., 2018). De esta forma, el SSP genera ingresos por más de un rubro (madera, carne y forraje) y aumenta la resiliencia económica y ecológica del predio frente a las variaciones de mercado o clima.

1.2.4. Importancia de la sombra en SSP

En los SSP, la sombra de los árboles genera un microclima más favorable que reduce el estrés térmico en el ganado, especialmente en verano o ante eventos climáticos extremos. Esta mejora en el confort se traduce en una mayor eficiencia de pastoreo, una mejor recuperación posparto y mayores ganancias de peso, tanto en vacas como en sus crías (Rivera et al., 2023). En el trabajo de Goncherenko et al. (2021), se señala que estos beneficios están asociados a una mejor calidad del forraje bajo sombra y a un comportamiento más activo de los animales, que pastorean por más tiempo y recorren mayores áreas.

En un trabajo de Schinato (2022), en un SSP con *Eucalyptus grandis* dispuesto en hileras triples, se observó que el microclima generado por los árboles permitió condiciones de mayor confort térmico para el ganado, al reducir la temperatura

ambiental y la radiación directa. Este servicio ecosistémico fue identificado como un beneficio ambiental clave, con impacto en el rendimiento productivo de los animales.

En otros estudios en Uruguay se demostró que los novillos con acceso a sombra natural en SSP pueden alcanzar ganancias diarias de peso hasta un 14 % mayores en comparación con animales sin sombra, incluso con niveles similares de consumo (Canozzi et al., 2022). Este efecto se explica por la menor carga térmica, que reduce el gasto energético destinado a la termorregulación (Kuchman Robaina et al., 2022).

Por tanto, en el contexto de los SSP, la sombra generada por los árboles no solo representa un beneficio de bienestar animal, sino también un factor productivo, estrechamente ligado a la rentabilidad del sistema. Esto refuerza la visión multifuncional de estos esquemas, en los que la producción de madera, forraje y carne se integra de manera sinérgica.

1.3. ESTIMACIÓN DE VARIABLES FORESTALES: NECESIDADES Y ENFOQUES

En los SSP al igual que los sistemas forestales puros, la caracterización precisa del componente arbóreo se realiza por medio de inventarios forestales. Con los inventarios forestales se pretende medir y estimar variables forestales clave, como la altura total del árbol, el diámetro a la altura del pecho (DAP), el volumen maderable y la biomasa aérea. Estas variables son fundamentales para estimar la productividad forestal, planificar el aprovechamiento de los recursos y cuantificar servicios ecosistémicos como la captura de carbono (Ordóñez Díaz et al., 2015; Viñoles et al., 2022).

Los métodos tradicionales para estimar variables dasométricas, como los inventarios de campo mediante parcelas representativas, han sido ampliamente utilizados para evaluar el crecimiento forestal y planificar el manejo silvícola. Sin embargo, estos procedimientos demandan una gran inversión económica y temporal, lo que dificulta su aplicación a gran escala (Rizzo-Martín et al., 2023). Además, presentan limitaciones prácticas en sistemas de baja densidad o distribución heterogénea de árboles, como los SSP, donde el muestreo resulta más complejo y menos representativo (Sancho et al., 2021; White et al., 2013).

Ante estas limitaciones, se hace necesaria la incorporación de herramientas eficientes, no destructivas y con capacidad de cubrir grandes superficies, como la tecnología Light Detection and Ranging (LiDAR). Esta tecnología permite estimar variables estructurales a partir de métricas derivadas de la nube de puntos, tales como la altura del dosel, la densidad de vegetación, los percentiles de altura, entre otras (Chave et al., 2014; Fassnacht et al., 2016; Hirigoyen et al., 2020; Rizzo-Martín et al., 2023).

Diversos estudios han demostrado que las métricas LiDAR presentan alta correlación con datos obtenidos en campo, permitiendo el ajuste de modelos estadísticos capaces de explicar más del 80 % de la variabilidad en altura, biomasa o volumen, tanto en plantaciones como en sistemas forestales mixtos (Jubanski et al., 2013; Ruiz et al., 2014; Saarela et al., 2020). En particular, investigaciones recientes en plantaciones de *Eucalyptus* en Uruguay han validado su aplicabilidad para la caracterización estructural del rodal y la estimación de indicadores silvícolas como la altura dominante, el volumen total y el índice de sitio, con elevados niveles de precisión (Hirigoyen et al., 2020; Rizzo-Martín et al., 2023).

En el contexto de los SSP, el uso de esta tecnología no solo mejora la precisión de las estimaciones, sino que también facilita la espacialización de variables a escala de árbol individual, optimizando el manejo y la toma de decisiones (Keefe et al., 2022; Valbuena-Rabadán et al., 2016; Zhou et al., 2025).

1.4. SENSORAMIENTO REMOTO APLICADO A LA GESTIÓN DE RECURSOS FORESTALES

La teledetección se define como la adquisición de información sobre objetos o superficies terrestres utilizando sensores que no tienen contacto físico con el objeto observado, utilizando plataformas aéreas o espaciales (Lillesand et al., 2015; Schowengerdt, 2006). Los sensores se dividen en dos tipos: sensores pasivos y sensores activos. Los sensores pasivos captan la energía reflejada o emitida naturalmente por la superficie terrestre, mientras que los sensores activos emiten pulsos láser o microondas hacia la superficie y registran la información de retorno generada por su interacción con los objetos (Jensen, 2007; Toth & Józków, 2016).

En varios trabajos vinculados al ámbito forestal se utilizaron diferentes sensores activos y pasivos. Dentro de los sensores activos, los más utilizados son los sensores LiDAR, que permiten obtener información tridimensional del dosel y del terreno, y también se está investigando el uso de sensores de radar, como los sistemas de radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar, SAR), por su capacidad de operar en condiciones climáticas adversas (Singh & Sreevalsan-Nair, 2023; White et al., 2016). Los sensores pasivos más utilizados son los sensores multiespectrales a bordo de satélites, como Sentinel-2 y Landsat, y en plataformas aéreas como drones; además, se está investigando el uso de sensores hiperespectrales por su capacidad para identificar características biofísicas y químicas de la vegetación con mayor precisión (Getie et al., 2024; Singh & Sreevalsan-Nair, 2023).

1.4.1. Tecnología LiDAR y su aplicación en sistemas productivos

El sistema LiDAR es una tecnología de teledetección activa que emite pulsos de luz láser y mide el tiempo que tardan en regresar tras impactar sobre superficies, lo que permite construir nubes de puntos tridimensionales con alta precisión espacial. Esta información posibilita caracterizar tanto la estructura del dosel como la

topografía del terreno, resultando especialmente útil en inventarios forestales y en el mapeo de ambientes complejos (Singh & Sreevalsan-Nair, 2023).

Dentro del enfoque de silvicultura de precisión, el LiDAR permite estimar con gran exactitud variables estructurales como altura total, DAP, densidad de vegetación, área basal y volumen, tanto a nivel de árbol individual como de rodal. Esta información facilita la elaboración de censos virtuales y la espacialización de la productividad, mejorando significativamente la toma de decisiones en prácticas de manejo forestal como raleos, cosechas y proyecciones de crecimiento futuro (Fassnacht et al., 2016; Hirigoyen et al., 2020; Rizzo-Martín et al., 2023; Singh & Sreevalsan-Nair, 2023).

1.4.2. Plataformas de relevamiento mediante tecnología LiDAR

Aunque la tecnología LiDAR se basa en un mismo principio físico, su aplicación real depende profundamente de la plataforma utilizada (avión, drones, mochila, vehículos terrestres), ya que cada una ofrece diferentes niveles de densidad de puntos, cobertura del dosel y detalle del terreno. La elección de la plataforma debe por tanto alinearse con la escala del estudio y el nivel de resolución espacial requerido para capturar las variables de interés (Dai et al., 2022; Kamp et al., 2023; Lin et al., 2022).

Los sistemas LiDAR aerotransportados montados en aeronaves tripuladas, como los aviones, permiten adquirir información sobre grandes superficies forestales con densidades de puntos que comúnmente oscilan entre 0,5 y 20 puntos/m², dependiendo de la configuración del sensor y del objetivo del inventario, siendo adecuados para estudios a escala regional o de paisaje (Treitz et al., 2012; Xiang et al., 2024).

Por su parte, el LiDAR a bordo de drones, permite alcanzar densidades significativamente mayores (entre 200 y 3.000 puntos/m²), lo que lo hace ideal para relevamientos de alta precisión en superficies más acotadas (Plaza, 2020; Wallace et al., 2012). Finalmente, el LiDAR terrestre (Terrestrial Laser Scanning, TLS), transportado por una persona o montado sobre vehículos, se utiliza para escanear con gran detalle estructuras individuales, como el tronco y la copa de los árboles, siendo particularmente útil en estudios de arquitectura arbórea o análisis estructurales de alta precisión (Calders et al., 2015).

1.4.3. Métricas derivadas del LiDAR y su utilidad forestal

Las nubes de puntos obtenidas mediante sensores LiDAR permiten obtener métricas estructurales clave para describir la arquitectura del bosque. Entre las más utilizadas se destacan los percentiles de altura, fundamentales para estimar la altura dominante y la estructura vertical del dosel (Lefsky et al., 2002; Wulder et al., 2012), y la densidad de retornos, indicador directo de la complejidad del dosel y de la

distribución de biomasa (Hirigoyen et al., 2020; Popescu et al., 2004). Otras métricas relevantes incluyen la altura media del dosel y la cobertura vegetal, útiles para evaluar continuidad y densidad arbórea (Andersen et al., 2001; Wulder et al., 2012).

Cuando el análisis se realiza a nivel de árbol individual, el sensor LiDAR permite estimar variables como la altura total y el área de copa, esenciales para modelos dasométricos avanzados (Popescu & Zhao, 2008). En conjunto, estas métricas sustentan estimaciones no destructivas de volumen, biomasa y área basal, consolidando al LiDAR como una herramienta de alta precisión para los inventarios forestales modernos (Borsah et al., 2023; Dubayah & Drake, 2000; Lefsky et al., 2002; Zhao et al., 2009).

1.4.4. Aplicaciones del LiDAR en sistemas forestales y silvopastoriles en Uruguay: avances y resultados relevantes

En Uruguay, el uso de herramientas de teledetección para la gestión forestal ha crecido notablemente en los últimos años, especialmente en plantaciones comerciales de *Eucalyptus* spp. La incorporación de tecnologías como sensores remotos, imágenes satelitales y, particularmente, datos LiDAR ha permitido avanzar hacia un manejo más preciso, eficiente y sostenible del recurso forestal (Hirigoyen Domínguez, 2021). Diversos estudios en Uruguay han demostrado el potencial de estas herramientas en contextos tanto de plantaciones puras como de SSP (Dogliotti et al., 2023; Dos Santos Villegas, 2023; Hirigoyen et al., 2020; Hirigoyen Domínguez, 2021; Rizzo-Martín et al., 2023; Siri Pérez, 2024).

En un trabajo de Hirigoyen Domínguez (2021), se integraron inventarios de campo con datos LiDAR e imágenes multiespectrales para modelar biomasa y volumen en plantaciones de *Eucalyptus dunnii* y *E. grandis*, logrando altos niveles de precisión mediante modelos paramétricos y de aprendizaje automático (R^2 de 0,93 y 0,96, respectivamente). De forma complementaria, Rizzo-Martín et al. (2023) aplicaron métricas derivadas de LiDAR aerotransportado para estimar la altura dominante e índice de sitio en rodales de *E. dunnii*, obteniendo resultados robustos (R^2 de hasta 0,84 y RMSE inferiores a 1 metro), lo que permite una rodalización más eficiente y una planificación productiva más ajustada a la variabilidad del sitio.

En una tesis reciente de Siri Pérez (2024) se validaron técnicas remotas para optimizar inventarios y gestión de plantaciones, reduciendo tiempo y costos comparados con métodos tradicionales.

En SSP, donde la estructura arbórea es más heterogénea, Dogliotti et al. (2023) demostraron que el uso de LiDAR aerotransportado permite segmentar copas individuales y caracterizar variables estructurales del dosel en plantaciones de *E. grandis*. Este tipo de aplicaciones amplía significativamente el alcance de la tecnología LiDAR hacia entornos agroforestales complejos, donde tradicionalmente su uso se encuentra limitado.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar modelos de estimación de variables forestales en un sistema silvopastoril mediante el uso de métricas obtenidas a partir de datos LiDAR.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estimar la altura total para las especies *E. grandis* y *E. dunnii* a nivel de árbol individual en un ensayo bajo régimen silvopastoril.
- Estimar el DAP para las especies *E. grandis* y *E. dunnii* a nivel de árbol individual en un ensayo bajo régimen silvopastoril.
- Comparar altura total y DAP entre tratamientos.

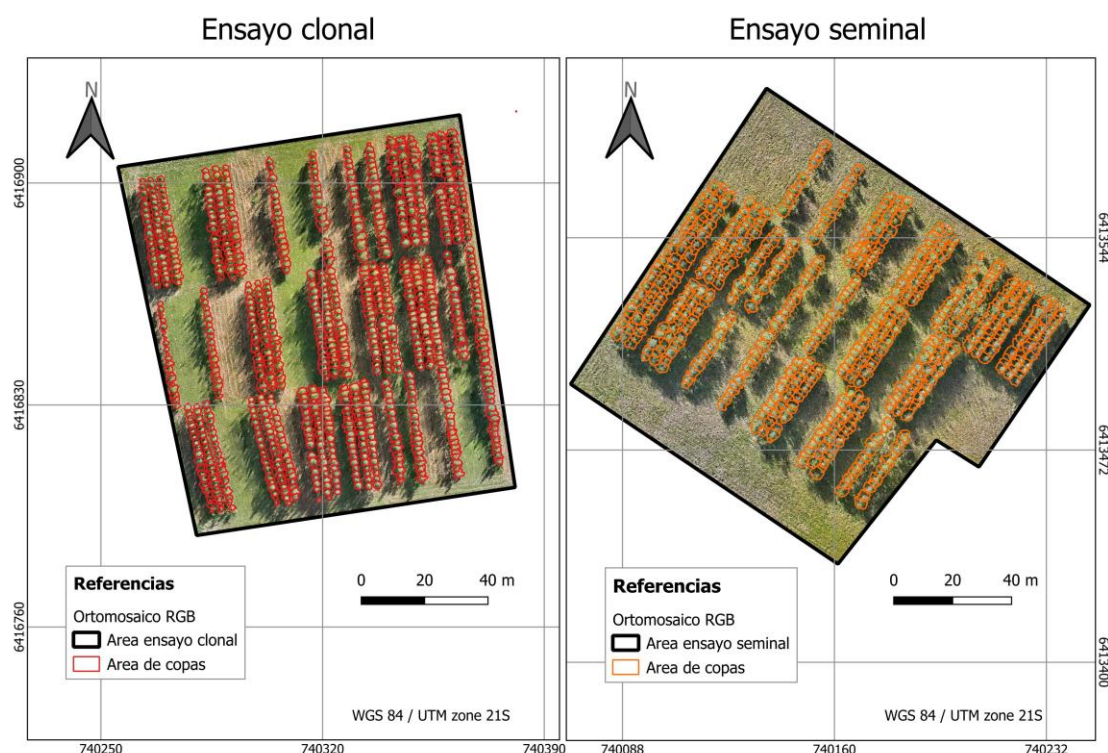
3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en la estación experimental “Estación Experimental Prof. Bernardo Rosengurt” (EEBR), en el departamento de Cerro Largo (Figura 1).

Figura 1

Mapa del área de estudio comprendido por los ensayos de origen clonal y seminal



La precipitación media anual para la zona de estudio se encuentra entre 1200-1300 mm. La temperatura media anual para la zona se localiza entre 17-17,5 °C (Instituto Uruguayo de Meteorología [INUMET], s.f.).

Las principales unidades de suelo de las zonas de estudio según la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000 son Arroyo Blanco (AB) y Zapallar (Zp). El área del ensayo seminal se ubica en AB, mientras que el ensayo clonal se ubica en Zp. Los suelos dominantes asociados a las unidades de suelo son Brunosoles Subéutricos Típicos/Lúvicos para Arroyo Blanco y Luvisoles Melánicos Albicos para Zapallar. Los principales grupos de suelos CONEAT son 6.3 en el área del ensayo seminal y 13.32 en el área del ensayo clonal (Durán, 1976).

La plantación de los ensayos se realizó en el mes de marzo del año 2022, presentando a la fecha 3 años. Los ensayos se encuentran establecidos bajo régimen silvopastoril, compartiendo el mismo diseño experimental, con un espaciamiento de 2

m entre árboles y 3 m entre filas en el caso de la disposición en triple fila, diferenciándose únicamente en el origen del material genético, siendo uno de procedencia seminal y el otro clonal. Ambos ensayos cuentan con ocho tratamientos y tres bloques. Cada tratamiento resulta de la combinación de dos anchos de callejón (9 m y 15 m), dos tipos de arreglo (filas simples o triples) y dos especies del género *Eucalyptus* (*E. grandis* y *E. dunnii*). A continuación, se presenta la Tabla 1 y la Figura 2 donde se detallan los tratamientos en ambos ensayos:

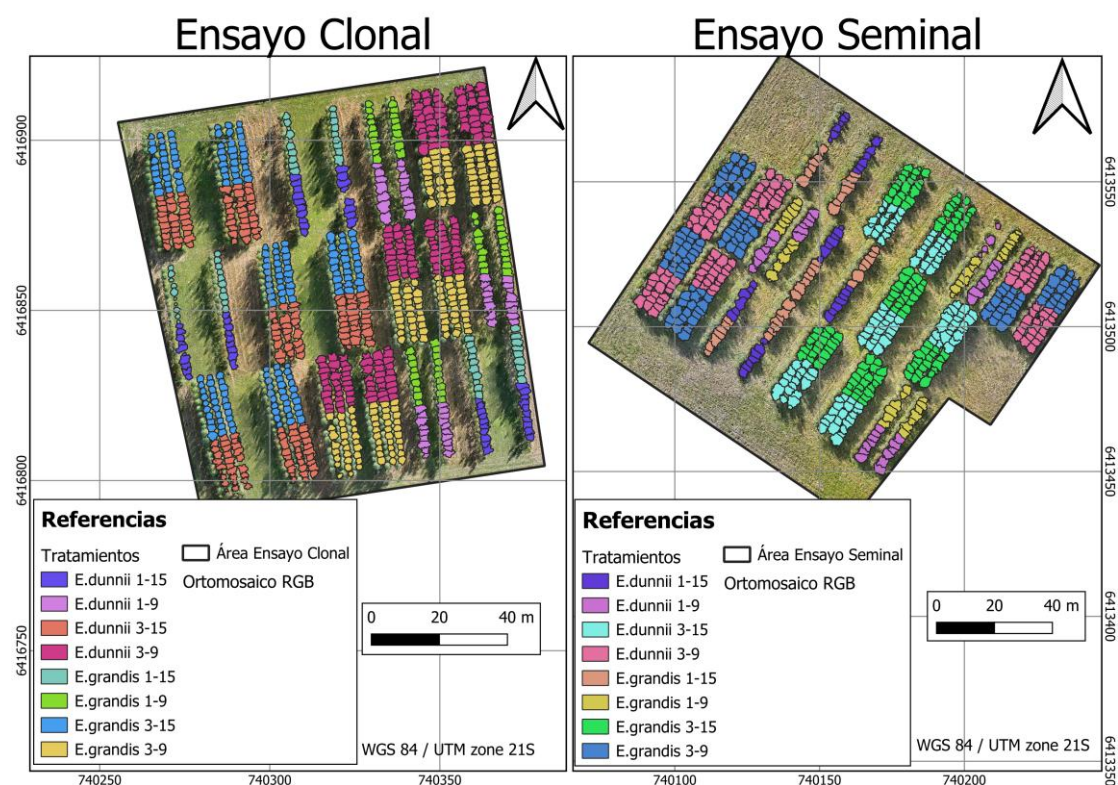
Tabla 1

Tratamientos en ensayos de origen clonal y seminal

Tratamiento	Especie	Nro. filas	Ancho de callejón (m)
1	<i>E.dunnii</i>	1	9
2	<i>E.dunnii</i>	1	15
3	<i>E.dunnii</i>	3	9
4	<i>E.dunnii</i>	3	15
5	<i>E.grandis</i>	1	9
6	<i>E.grandis</i>	1	15
7	<i>E.grandis</i>	3	9
8	<i>E.grandis</i>	3	15

Figura 2

Área de estudio comprendida por los ensayos de origen clonal y seminal discriminados por tratamientos



A continuación, se presenta la tabla 2 con los estadísticos descriptivos (media y desvío estándar) del DAP y de la Ht, obtenidos a partir de las mediciones a campo realizadas en los ensayos clonal y seminal.

Tabla 2

Media y Desvío Estándar de las variables DAP y Ht con datos medidos a campo

Ensayo Clonal					
Especie	DAP		Ht		<i>n</i>
	Media	Desvío	Media	Desvío	
<i>E. grandis</i>	8,17	1,15	8,90	1,06	24
<i>E. dunnii</i>	6,67	1,30	6,84	1,21	24

Ensayo Seminal					
Especie	DAP		Ht		<i>n</i>
	Media	Desvío	Media	Desvío	
<i>E. grandis</i>	9,65	1,04	9,30	1,28	24
<i>E. dunnii</i>	8,78	1,19	8,58	1,46	24

Nota. DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm), Ht: Altura total (m), *n*: Número de árboles evaluados.

3.2. DATOS DE CAMPO Y DATOS LIDAR

3.2.1. Recolección de datos en campo

Para la recolección de datos en campo, se seleccionaron aleatoriamente 96 árboles en los dos ensayos del estudio distribuidos equitativamente por tratamiento. Posteriormente se georreferenciaron con un GPS de alta precisión Trimble Catalyst DA2.

La georreferenciación precisa posibilita asegurar la correspondencia precisa entre los árboles medidos y la información de los sensores utilizados a bordo de drones. A cada árbol seleccionado, se le midió la altura total (Ht) con clinómetro electrónico Haglöf EC II D-R, y el diámetro a la altura del pecho (DAP) utilizando una forcípula.

3.2.2. Relevamiento LiDAR y segmentación de copas

Se llevó a cabo un vuelo sobre toda la superficie de los dos ensayos utilizando un sensor LiDAR a bordo de un vehículo aéreo no tripulado (VANT). El vuelo con el sensor LiDAR (Zenmuse L2, DJI, Shenzhen, China) se realizó a una altura de 45 m sobre el nivel del suelo, con un solapamiento del 85% en dirección longitudinal y del 60% en dirección transversal. Para procesar los datos obtenidos, se utilizó el software Agisoft Metashape, con el cual se generó, visualizó y clasificó la nube de puntos en formato LAS, además de crear el modelo digital de terreno (MDT). La nube de puntos

se clasificó para identificar los puntos correspondientes al suelo y aquellos que representan la vegetación. Posteriormente, mediante el lenguaje de programación R, se emplearán funciones de las librerías “*lidR*” (R package version 1) y “*sf*” (Pebesma, 2018) para normalizar la nube de puntos utilizando el MDT generado con Agisoft Metashape. Esta normalización permitió generar el modelo digital de vegetación (MDV) con una resolución espacial de 10 cm, el cual se utilizó como entrada para el paquete ‘*ForestTools*’ de R (R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria). Con dicho paquete, se aplicaron las funciones ‘*vwf*’ y ‘*mcws*’ para segmentar las copas de los árboles. Luego se utilizó la herramienta Estadística de Zona del software QGIS con el objetivo de obtener el valor máximo del MDV del conjunto de píxeles de cada polígono de copa. Se obtuvo el valor máximo de MDV (MDV max) ya que este píxel representa el valor de la altura total (Ht) y por ende se relaciona a el diámetro a la altura del pecho (DAP) (Castillo-Gallegos et al., 2018; Ganz et al., 2019; Shrestha & Wynne, 2012).

3.3. DESARROLLO, VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DE MODELOS

En primer lugar, para la modelización se procedió a dividir la base de datos por ensayo clonal y seminal. Posteriormente, se calculó la correlación de *Pearson* entre las variables forestales medidas (DAP y Ht) y el valor máximo del MDV de origen LiDAR, con el fin de cuantificar la correlación entre las variables. Luego se ajustaron modelos paramétricos en función del MDV max para la estimación de las variables Ht y DAP. Los modelos se ajustaron utilizando la función *lm* disponible en R. La función de *summary* en R se utilizó para obtener la intersección, la pendiente y el coeficiente de determinación (R^2). La función *RMSE* de la biblioteca *MLmetrics* se utilizó para calcular el RMSE de los modelos.

Para evaluar los supuestos del modelo de regresión ajustado, se realizó un análisis de normalidad y homocedasticidad de los residuos. La normalidad se verificó mediante el cálculo de los residuos estudentizados y la aplicación de la prueba de Anderson–Darling con la función *ad.test* de R. Donde un valor $p > 0.05$ determina que los residuos presentan una distribución normal. Asimismo, la homogeneidad de varianzas se evaluó mediante la prueba de Breusch–Pagan, con la función *bptest* de R. Donde un valor $p > 0.05$, confirma la ausencia de heterocedasticidad y confirma que la varianza de los errores permanece constante a lo largo del rango de predicción. En conjunto, estas pruebas respaldan la validez de los supuestos fundamentales del modelo.

Para evaluar la capacidad predictiva del modelo, se realizó la validación cruzada del tipo leave-one-out (LOOCV) en R (Alonso Battaglia & De Francisco, 2022; Domingo Ruiz, 2015; Hirigoyen Domínguez, 2021; Rizzo-Martín et al., 2023). Este procedimiento consistió en ajustar el modelo tantas veces como observaciones contiene el conjunto de datos. En cada iteración, se excluyó una única observación, se ajustó el modelo con el resto de los datos, y posteriormente se predijo el valor de la

observación omitida. Este enfoque permitió obtener un conjunto de valores predichos completamente independientes del proceso de ajuste del modelo, lo cual proporcionó una estimación más realista del desempeño predictivo. Con estos valores se calcularon métricas de ajuste tales como el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2), comparando los valores predichos frente a los observados.

Finalmente, se elaboró un gráfico de dispersión entre valores observados y predichos, complementado con una recta de regresión, con el fin de visualizar la precisión del modelo y la concordancia entre ambas series de valores. Posteriormente, los modelos ajustados fueron aplicados a los valores de MDV max correspondientes a cada árbol presente en los ensayos, con el objetivo de estimar las variables Ht y DAP a nivel poblacional.

3.4. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE TRATAMIENTOS

Luego de estimar las variables Ht y DAP de cada árbol de la población se procedió a realizar la comparación estadística entre tratamientos para el ensayo de origen clonal y seminal por separado. La comparación estadística entre tratamientos en cada ensayo se orientó a evaluar el efecto del manejo silvícola, definido por el número de filas (1 y 3) y la distancia entre filas (9 y 15 m), sobre la altura total (Ht) y el diámetro a la altura del pecho (DAP).

Las posibles diferencias en los valores promedio de Ht y DAP entre *E. grandis* y *E. dunnii* responden a características intrínsecas de crecimiento propias de cada especie. Por este motivo, las comparaciones estadísticas en el ensayo clonal se limitaron a tratamientos dentro de cada especie, evitando interpretaciones sesgadas por diferencias interespecíficas.

Para evaluar diferencias en las variables Ht y DAP entre los distintos tratamientos, se aplicó inicialmente un análisis de varianza de una vía (ANOVA). Antes de la interpretación de los resultados, se verificaron los supuestos del modelo mediante la prueba de Kolmogorov–Smirnov (función *ks.test* en R) y la prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas con la función *leveneTest* de la librería *car*. Dado que ambas pruebas indicaron que los supuestos de normalidad y homogeneidad se cumplían, se procedió a aplicar un ANOVA paramétrico utilizando la función *aov* de R. Para identificar qué tratamientos diferían significativamente entre sí, se realizó una comparación múltiple de Tukey mediante la función *HSD.test* del librería *agricolae*, la cual asigna letras distintas a los grupos significativamente diferentes, facilitando la interpretación de las diferencias entre tratamientos.

4. RESULTADOS

4.1. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE Ht Y DAP PARA EL ENSAYO CLONAL

4.1.1. Modelo de estimación de Ht

El análisis de correlación entre el MDV max obtenido a partir del vuelo LiDAR y la Ht mostró un coeficiente de correlación de *Pearson* de $r = 0,97$.

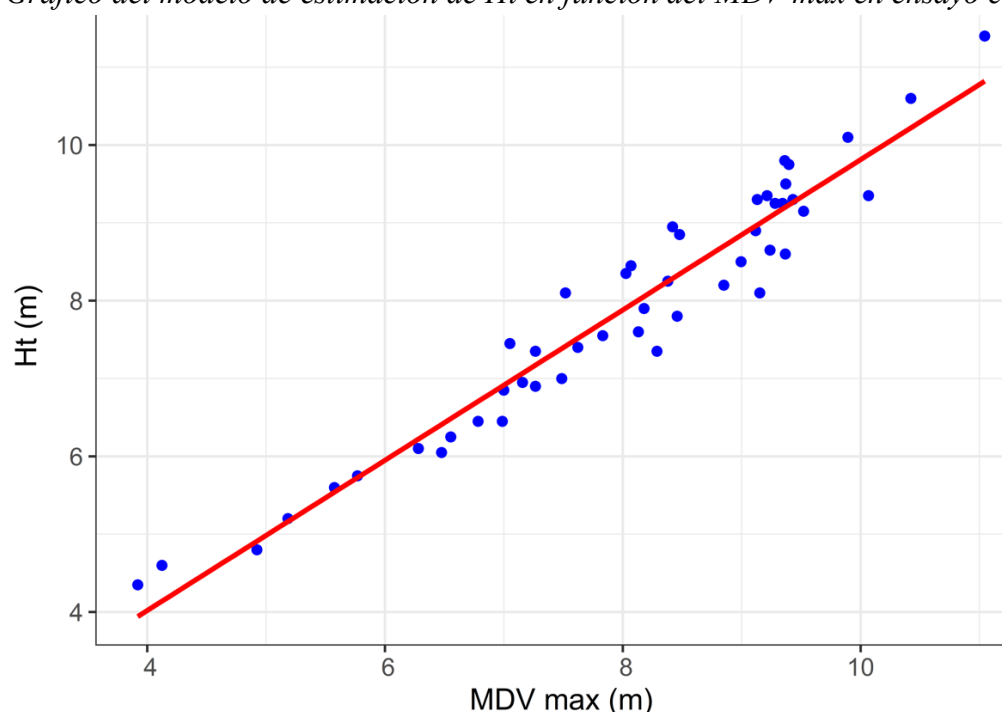
El modelo lineal ajustado para la estimación de la altura total fue:

$$Ht = 0,16 + 0,96MDV \text{ max}$$

La figura 3 presenta la relación entre la Ht y el MDV max para el ensayo clonal, junto con la recta de ajuste del modelo de regresión lineal utilizado para su estimación.

Figura 3

Gráfico del modelo de estimación de Ht en función del MDV max en ensayo clonal



El modelo ajustado presentó un valor de coeficiente de determinación de $R^2 = 0,93$. En términos de precisión, el error cuadrático medio (RMSE) fue de 0,40 m, lo que indica un adecuado desempeño predictivo.

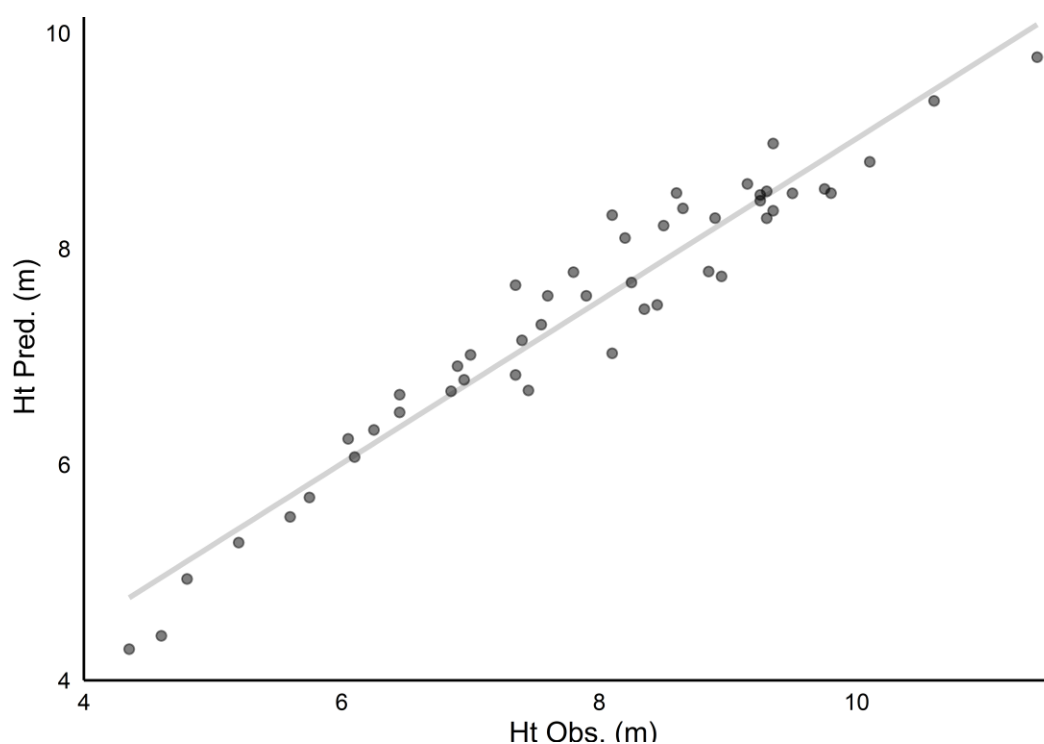
La evaluación de los supuestos del modelo, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, mostró resultados satisfactorios donde el test de Anderson–Darling aplicado a los residuos no evidenció desviaciones significativas de la

normalidad (p -valor = 0,29), mientras que el test de Breusch–Pagan studentizado no detectó heterocedasticidad significativa (p -valor = 0,06).

Adicionalmente, el análisis de los valores predichos versus observados para la altura total evidenció un buen ajuste del modelo, con un RMSE de 0,68 m y un coeficiente de correlación de Pearson elevado ($r = 0,97$), lo que confirma la fuerte relación lineal entre ambas variables (figura 4).

Figura 4

Gráfico de correlación entre valores observados y predichos de Ht en ensayo clonal



4.1.2. Modelo de estimación de DAP

El análisis de correlación entre el MDV máximo obtenido a partir del vuelo LiDAR y el DAP arrojó un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0,86$.

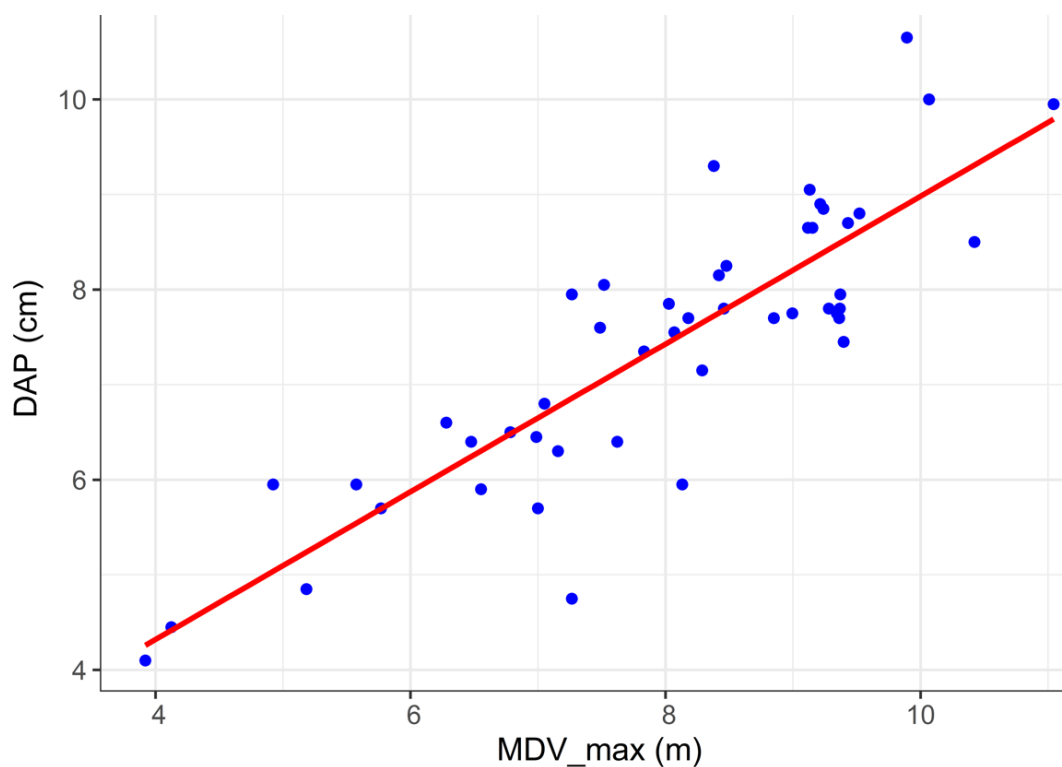
El modelo lineal ajustado para la estimación del DAP fue:

$$DAP = 1,21 + 0,78MDV \text{ max}$$

La figura 5 presenta la relación entre el DAP y el MDV max para el ensayo clonal, junto con la recta de ajuste del modelo de regresión lineal utilizado para su estimación.

Figura 5

Gráfico del modelo de estimación del DAP en función del MDV max en ensayo clonal



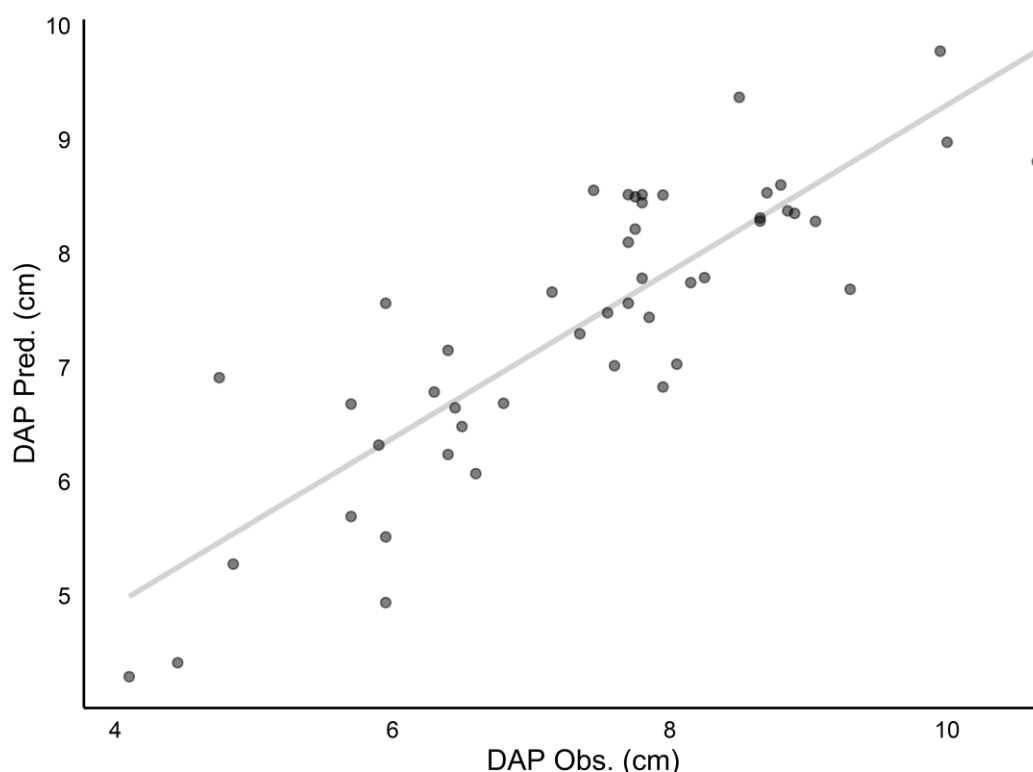
El modelo ajustado explicó una proporción considerable de la variabilidad observada en el DAP, alcanzando un valor de $R^2 = 0,73$. En términos de precisión, el RMSE fue de 0,73 cm.

El test de normalidad aplicado a los residuos no evidenció desviaciones significativas respecto a una distribución normal ($p\text{-valor} = 0,34$), mientras que el test de homogeneidad de varianzas indicó ausencia de heterocedasticidad ($p\text{-valor} = 0,44$), confirmando el cumplimiento de los supuestos del modelo lineal.

El análisis de los valores predichos frente a los observados para el DAP evidenció un buen ajuste del modelo, con un RMSE de 0,76 cm y un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0,85$, lo que refleja una asociación fuerte entre los valores estimados y los medidos a campo (Figura 6).

Figura 6

Gráfico de la correlación entre valores observados y predichos del DAP en ensayo clonal



4.2. MODELOS DE ESTIMACIÓN DE Ht Y DAP PARA EL ENSAYO SEMINAL

4.2.1. Modelo de estimación de Ht

El análisis de correlación entre el MDV máximo obtenido a partir del vuelo LiDAR y la Ht arrojó un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0,96$.

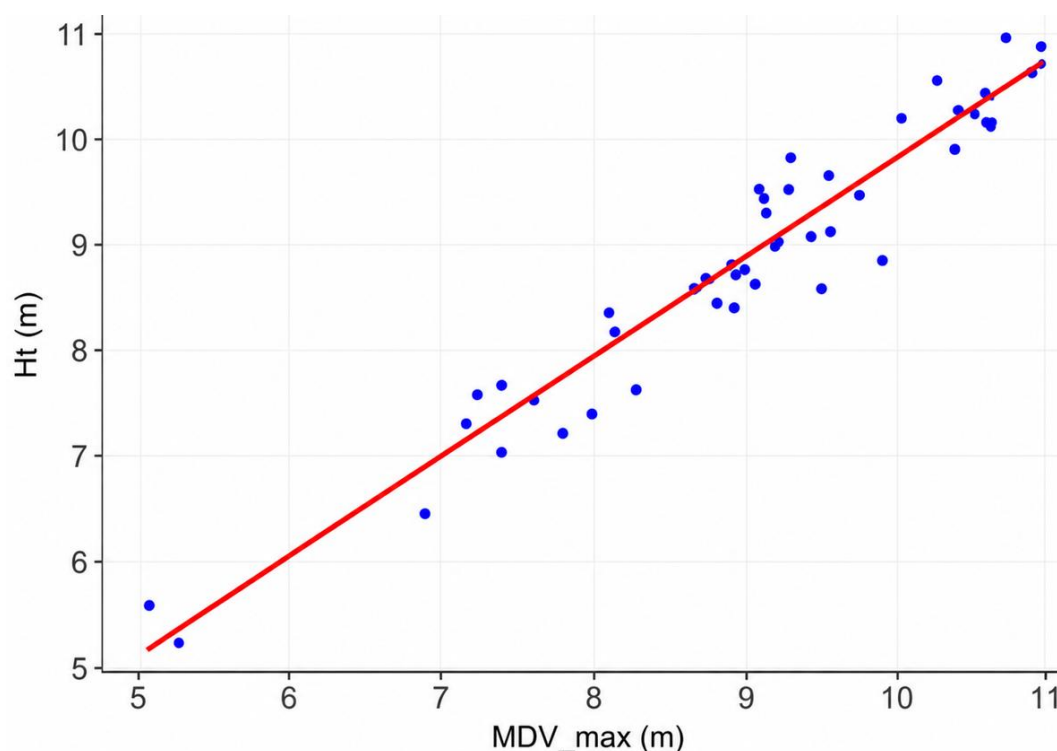
El modelo lineal ajustado para la estimación de la Ht fue:

$$Ht = -0,4 + 1,04MDV \text{ max}$$

La figura 7 presenta la relación entre la Ht y el MDV max para el ensayo seminal, junto con la recta de ajuste del modelo de regresión lineal utilizado para su estimación.

Figura 7

Gráfico del modelo de estimación de Ht en función del MDV max en ensayo seminal



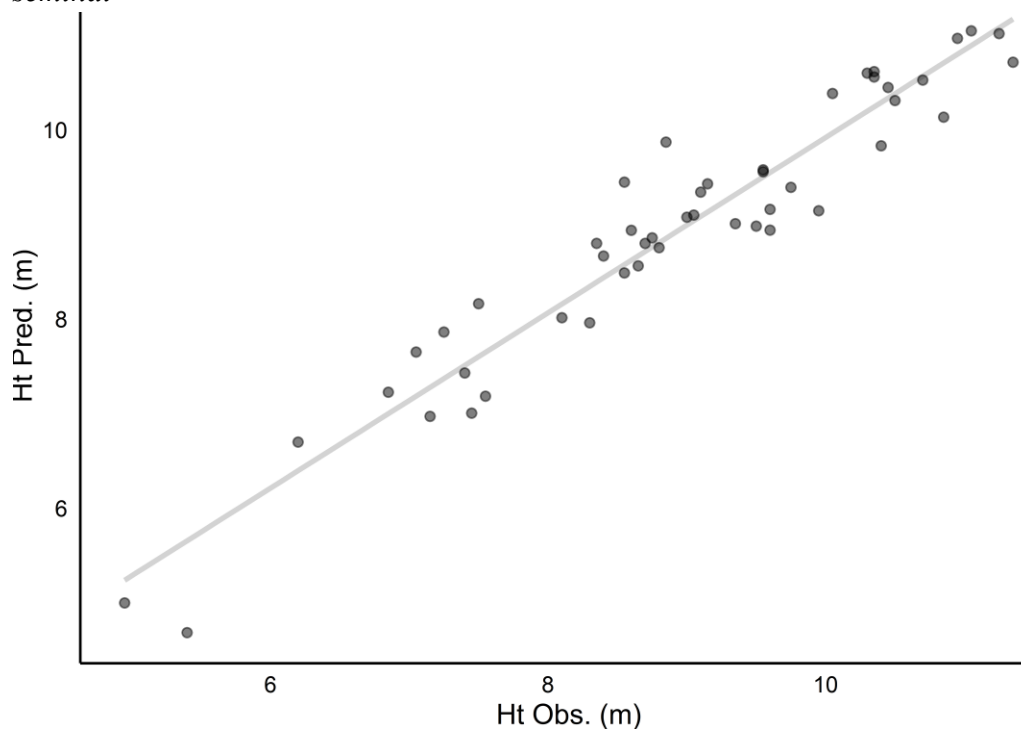
El modelo ajustado presentó un valor de $R^2 = 0,92$. En cuanto a la precisión del modelo, el RMSE obtenido fue de 0,40 m.

El test de normalidad aplicado a los residuos no mostró evidencias de desviaciones significativas respecto a una distribución normal (p -valor = 0,79), mientras que el análisis de homogeneidad de varianzas indicó ausencia de heterocedasticidad (p -valor = 0,90), confirmando la validez de los supuestos del modelo lineal.

El análisis de los valores estimados frente a los observados para la altura total evidenció un ajuste muy satisfactorio, con un RMSE de 0,42 m y un coeficiente de correlación de Pearson elevado ($r = 0,96$), lo que pone de manifiesto la fuerte relación lineal entre ambas variables (Figura 8).

Figura 8

Gráfico de la correlación entre valores observados y predichos de Ht en ensayo seminal



4.2.2. Modelo de estimación de DAP

El análisis de correlación entre el MDV máximo y el diámetro a la altura del pecho (DAP) arrojó un coeficiente de correlación de Pearson de $r = 0,88$.

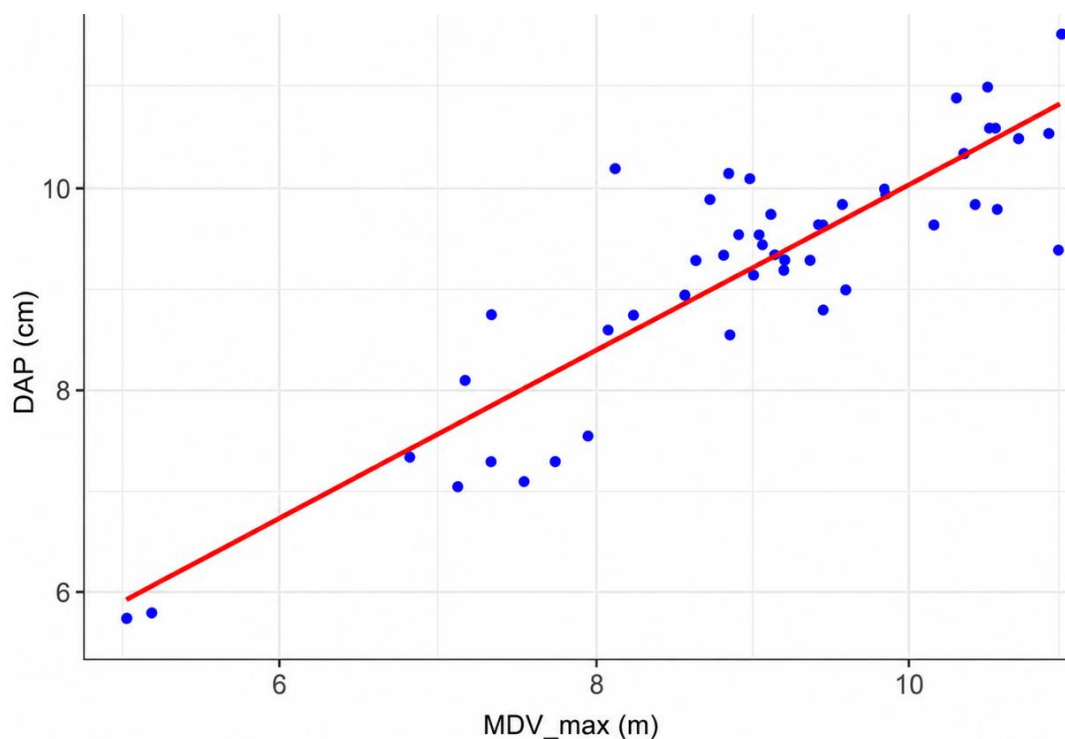
El modelo lineal ajustado para la estimación del DAP fue:

$$DAP = 1,95 + 0,81MDV \text{ max}$$

La figura 9 presenta la relación entre el DAP y el MDV max para el ensayo seminal, junto con la recta de ajuste del modelo de regresión lineal utilizado para su estimación.

Figura 9

Gráfico del modelo de estimación del DAP en función del MDV max en ensayo seminal



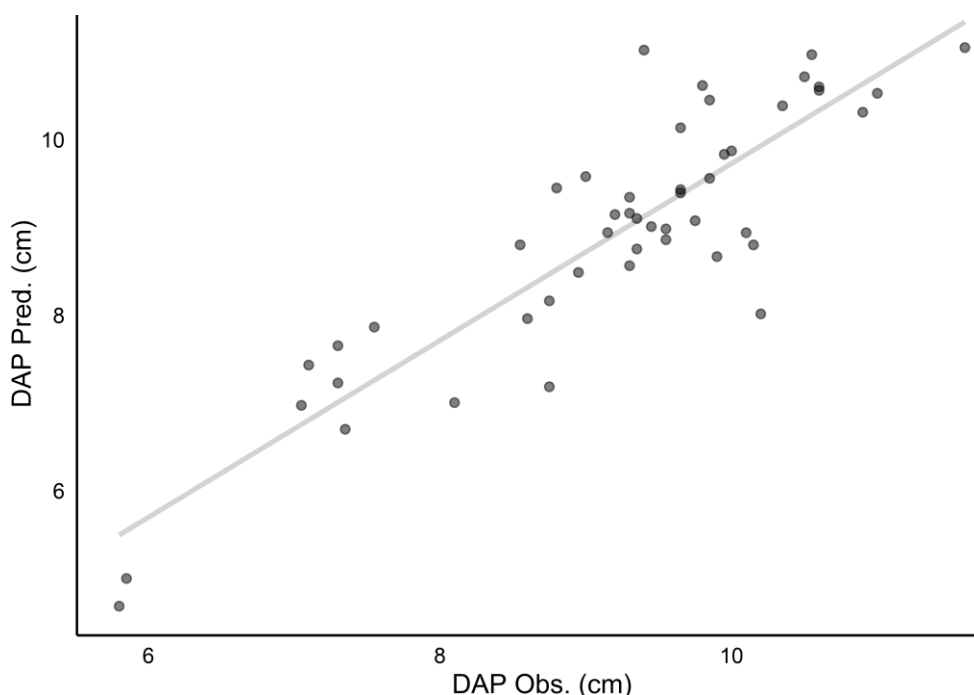
El modelo desarrollado para la estimación del DAP presentó un valor de $R^2 = 0,78$. En términos de precisión, el RMSE obtenido fue de 0,59 cm.

El análisis de normalidad de los residuos no evidenció desviaciones significativas (p -valor = 0,32), mientras que el test de homogeneidad de varianzas indicó ausencia de heterocedasticidad (p -valor = 0,88), confirmando la estabilidad de la varianza a lo largo del rango de valores estimados.

Por su parte, el análisis de los valores predichos frente a los observados para el DAP mostró un buen ajuste del modelo, con un RMSE de 0,73 cm y un coeficiente de correlación de Pearson elevado ($r = 0,88$), lo que evidencia una asociación lineal fuerte entre ambas variables y una adecuada capacidad predictiva del modelo (figura 10).

Figura 10

Gráfico de la correlación entre valores observados y predichos del DAP en ensayo seminal



A continuación, se presenta el resumen de los modelos ajustados para la estimación de Ht y DAP en función de la variable independiente MDV max (tabla 3).

Tabla 3

Resumen de resultados de los modelos de estimación de Ht y DAP en ambos ensayos

Ensayo	Variable	Modelo	R ²	RMSE	A.resid. (p-valor)	A.var. (p-valor)
Clonal	Ht	$Ht = 0,16 + 0,96MDV_{max}$	0,93	0,40 m	0,29	0,06
Clonal	DAP	$DAP = 1,21 + 0,78MDV_{max}$	0,73	0,73 cm	0,34	0,44
Seminal	Ht	$Ht = -0,4 + 1,04MDV_{max}$	0,92	0,40 m	0,79	0,9
Seminal	DAP	$DAP = 1,95 + 0,81MDV_{max}$	0,78	0,59 cm	0,32	0,88

Nota. Ht: Altura total (m). DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm). R²: Coeficiente de determinación del modelo. RMSE: Raíz del error cuadrático medio. p-valor: Nivel de significancia estadística asociado a los tests de validación de supuestos (normalidad y homogeneidad de varianzas). A. resid.: Análisis de los residuos. A. var.: Análisis de varianzas.

4.3. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE Ht Y DAP

Luego de obtener los modelos de estimación de Ht y DAP, se aplicaron sobre la variable independiente MDV max presente en cada copa de árbol segmentada de los ensayos clonal y seminal. A continuación, se presentan las tablas con la estimación de dichas variables y sus estadísticos para cada ensayo:

Tabla 4

Media y Desvío Estándar de las variables DAP y Ht por especie en ambos ensayos

Ensayo Clonal					
Especie	DAP		Ht		<i>n</i>
	Media	Desvío	Media	Desvío	
<i>E. grandis</i>	7,76	1,15	8,29	1,43	469
<i>E. dunnii</i>	6,25	1,30	6,41	1,61	451

Ensayo Seminal					
Especie	DAP		Ht		<i>n</i>
	Media	Desvío	Media	Desvío	
<i>E. grandis</i>	9,18	1,42	8,89	1,54	327
<i>E. dunnii</i>	8,99	1,20	8,65	1,80	317

Nota. DAP: Diámetro a la altura del pecho (cm), Ht: Altura total (m), *n*: Número de árboles evaluados.

4.4. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE TRATAMIENTOS

La comparación estadística entre tratamientos del ensayo clonal y seminal evidenció diferencias significativas en la Ht y el DAP entre los distintos tratamientos evaluados. El análisis se realizó mediante comparación de medias, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, donde letras distintas indican diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. A continuación, se presentan las tablas donde se observan los resultados de la comparación estadística entre tratamientos en ambos ensayos:

Tabla 5

Comparación estadística entre tratamientos del ensayo clonal

Origen	Código tratamiento	Tratamiento	<i>n</i>	GS Ht	Ht media	GS DAP	DAP media
Clon	1	<i>E.dunnii-1-9</i>	51	<i>ab</i>	6.71	<i>ab</i>	6.48
	2	<i>E.dunnii-1-15</i>	57	<i>c</i>	4.93	<i>c</i>	5.05
	3	<i>E.dunnii-3-9</i>	169	<i>d</i>	7.54	<i>d</i>	7.15
	4	<i>E.dunnii-3-15</i>	174	<i>ac</i>	5.73	<i>ac</i>	5.70
	5	<i>E.grandis-1-9</i>	59	<i>e</i>	8.68	<i>e</i>	8.07
	6	<i>E.grandis-1-15</i>	58	<i>bd</i>	7.23	<i>bd</i>	6.90
	7	<i>E.grandis-3-9</i>	173	<i>e</i>	8.94	<i>e</i>	8.28
	8	<i>E.grandis-3-15</i>	179	<i>d</i>	7.88	<i>d</i>	7.43

Nota. *n*: Número de árboles evaluados. GS Ht: Grupo de significancia estadística para la altura total. GS DAP: Grupo de significancia estadística para el diámetro a la altura del pecho. Ht media: Altura total promedio. DAP media: Diámetro promedio a la altura del pecho.

Tabla 6*Comparación estadística entre tratamientos del ensayo seminal*

Origen	Código tratamiento	Tratamiento	<i>n</i>	GS Ht	Ht media	GS DAP	DAP media
Semilla	1	<i>E.dunnii-1-9</i>	36	<i>ab</i>	8.21	<i>ab</i>	8.65
	2	<i>E.dunnii-1-15</i>	39	<i>c</i>	6.88	<i>c</i>	7.61
	3	<i>E.dunnii-3-9</i>	121	<i>ad</i>	9.00	<i>ad</i>	9.26
	4	<i>E.dunnii-3-15</i>	121	<i>ad</i>	9.00	<i>ad</i>	9.26
	5	<i>E.grandis-1-9</i>	41	<i>ab</i>	8.38	<i>ab</i>	8.78
	6	<i>E.grandis-1-15</i>	41	<i>bc</i>	8.37	<i>bc</i>	8.78
	7	<i>E.grandis-3-9</i>	120	<i>d</i>	9.36	<i>d</i>	9.54
	8	<i>E.grandis-3-15</i>	126	<i>abd</i>	8.78	<i>abd</i>	9.09

Nota. *n*: Número de árboles evaluados. GS Ht: Grupo de significancia estadística para la altura total. GS DAP: Grupo de significancia estadística para el diámetro a la altura del pecho. Ht media: Altura total promedio. DAP media: Diámetro promedio a la altura del pecho.

4.4.1. Comparación estadística entre tratamientos del ensayo clonal

Para *E. dunnii* se observaron diferencias significativas entre tratamientos tanto para la Ht como para el DAP. El tratamiento 3 presentó los mayores valores medios de Ht (7,54 m) y DAP (7,15 cm), diferenciándose claramente del tratamiento 2, que registró los menores valores de crecimiento (Ht = 4,93 m; DAP = 5,05 cm).

Entre los tratamientos 1 y 2 se observan diferencias significativas. Ambos tratamientos tienen fila simple, pero se diferencian en el espaciamiento, siendo mayor la altura en el tratamiento 1 que tiene un menor ancho de callejón. Cuando se compara entre los otros tratamientos 3 y 4, los cuales tienen un mismo número de filas (triple fila), pero diferente espaciamiento, también se observan diferencias significativas, presentando una mayor Ht y DAP el tratamiento 3, con un menor ancho de callejón. El tratamiento 4 mostró valores intermedios, sin diferenciarse estadísticamente de los tratamientos 1 y 2 (tabla 5).

Para *E. grandis*, los tratamientos 5 y 7 presentaron los mayores valores promedio de Ht y DAP, sin encontrarse diferencias significativas entre ellos y compartiendo el mismo ancho de callejón (9 metros). Los tratamientos 6 y 8 presentaron los menores valores promedio de Ht y DAP, sin diferencias significativas entre ellos y compartiendo el mismo ancho de callejón (15 metros).

En los tratamientos de una fila, el tratamiento 5 (9 m de ancho de callejón) presentó valores superiores al tratamiento 6 (15 m), mientras que en los tratamientos de triple fila el tratamiento 7 (9 m) superó al tratamiento 8 (15 m). Al comparar tratamientos con igual número de filas pero distinto ancho de callejón (5 vs. 6 y 7 vs.

8), se observaron diferencias significativas que reproducen el mismo patrón registrado en *Eucalyptus dunnii*, evidenciando que menores anchos de callejón se asocian con mayores valores de Ht y DAP (tabla 5).

Al comparar entre tratamientos con diferente número de filas y mismo ancho de callejón (5 vs. 7 y 6 vs. 8), no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, lo que indica que los tratamientos con tres filas (tratamientos 7 y 8), no mostraron un desempeño superior respecto a los tratamientos de una sola fila (tratamientos 5 y 6).

4.4.2. Comparación estadística entre tratamientos del ensayo seminal

En *E. dunnii*, el tratamiento 2 presentó la menor altura promedio (6,88 m), diferenciándose significativamente de los tratamientos en triple fila (3 y 4), que alcanzaron 9,00 m y no mostraron diferencias entre sí. El tratamiento 1 registró un valor intermedio (8,21 m), sin diferenciarse estadísticamente de los tratamientos de mayor desempeño. Este patrón indica que, en esta especie, el número de filas tuvo mayor incidencia sobre el crecimiento en altura que el ancho de callejón, dado que no se detectaron diferencias entre los arreglos 3 y 4 (tabla 6).

Por su parte, el ancho de callejón tiene un efecto importante sobre el crecimiento en los tratamientos de una fila, ya que el tratamiento 1 con un menor ancho de callejón (9 m), tiene una mayor Ht y DAP que el tratamiento 2 (ancho de callejón de 15 m), presentando diferencias significativas entre tratamientos.

En *E. grandis*, el tratamiento 7 alcanzó el mayor valor medio de Ht y DAP, diferenciándose significativamente de los tratamientos de una fila (tratamientos 5 y 6). El tratamiento 8 presentó un comportamiento intermedio, sin diferenciarse estadísticamente ni del tratamiento 7 (con mayor crecimiento) ni de los tratamientos 5 y 6. En este caso, la respuesta a la configuración espacial fue más marcada, evidenciándose una ventaja del arreglo en triple fila con menor ancho de callejón (tabla 6).

5. DISCUSIÓN

5.1. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE Ht PARA LOS ENSAYOS CLONAL Y SEMINAL

Los modelos de estimación de Ht desarrollados para ambos ensayos mostraron resultados consistentes, evidenciando una fuerte relación lineal entre el MDV máximo derivado del vuelo LiDAR y la Ht medida a campo. Los coeficientes de correlación obtenidos ($r = 0,97$ en el ensayo clonal y $r = 0,96$ en el seminal) confirman la solidez de esta asociación, respaldando el uso de métricas LiDAR para estimar la Ht en árboles no medidos.

Los elevados valores de R^2 (0,93 en clonal y 0,92 en seminal) indican que una proporción significativa de la variabilidad de la Ht es explicada por el MDV max. Este resultado se asocia a la correspondencia entre los retornos LiDAR de mayor elevación dentro de la copa (representados por el MDV máximo a nivel de píxel) y el ápice del dosel, que constituye el punto de referencia para la medición de la altura total en campo mediante el instrumento Haglöf. Este nivel de ajuste es comparable con lo reportado en estudios previos que utilizaron datos LiDAR para la estimación de variables dendrométricas, donde se han registrado coeficientes de determinación superiores a 0,90 en la estimación de la altura de árboles individuales y atributos estructurales de rodales (Fassnacht et al., 2016; Hernández Moreno et al., 2024; Hirigoyen Domínguez, 2021; Watt et al., 2013; Yu et al., 2004; Zhou et al., 2025). En un estudio realizado por Hirigoyen Domínguez (2021) en plantaciones de *Eucalyptus* spp. en Uruguay mediante LiDAR aerotransportado, se obtuvieron modelos de alta precisión para la estimación de la altura dominante (H_o), con valores de R^2 de hasta 0,98. Los modelos se basaron en percentiles altos de la distribución de alturas (p99 para *E. grandis* y p90 para *E. dunnii*), lo que evidencia la estrecha relación entre los retornos LiDAR de mayor elevación y la estructura superior del dosel. En contraste, en el presente estudio se estimó la altura total (Ht) a nivel de árbol individual, mientras que Hirigoyen Domínguez (2021) trabajó a escala de rodal, no obstante, ambas variables describen de manera consistente el crecimiento en altura.

A nivel internacional, diversos estudios han abordado la estimación de la altura a escala de árbol individual mediante datos LiDAR. En un estudio de Dalla Corte et al. (2020) en una plantación de *Eucalyptus benthamii* en Brasil, se georreferenciaron 63 árboles y se midieron en campo el DAP y la Ht, luego se generó una nube de puntos de alta densidad con un LiDAR aéreo, se aplicaron algoritmos para detectar árboles individuales y medir directamente su altura y DAP. Las correlaciones entre los datos de campo y los obtenidos por LiDAR fueron de 0,77 (DAP) y 0,91 (altura), con valores de RMSE de 11,3% (3,46 cm) y 7,9% (1,51 m), respectivamente. Para la altura medida con el LiDAR se utilizó el percentil 95. El estudio demostró que es posible estimar automáticamente el DAP y la Ht de árboles individuales a partir de datos LiDAR, obteniendo errores relativamente bajos. La alta

densidad de puntos permitió representar con precisión la estructura tridimensional del bosque y mejorar los cálculos de altura.

Enfoques basados en la segmentación de copas individuales, como los propuestos por Popescu y Wynne (2004) y Li et al. (2012), han demostrado que la altura total puede ser estimada de manera robusta a partir de la elevación máxima dentro de cada copa, lo que respalda el uso de métricas como el MDV max en el presente estudio.

El RMSE obtenido para ambos ensayos (0,40 m) se encuentra dentro de rangos considerados aceptables para la estimación de Ht en inventarios forestales, especialmente cuando se emplean métodos de alta precisión o datos LiDAR. En un trabajo de Hernández Moreno et al. (2024) en un bosque plantado de coníferas, donde se comparan datos dendrométricos obtenidos mediante LiDAR aerotransportados, con métodos tradicionales (realizado de forma manual con forcípula y clinómetro), se obtuvieron resultados de $R^2 = 0.98$ y $RMSE = 0.369$ m para la Ht, concluyendo que el inventario a partir de LiDAR es más confiable, preciso y consume menos tiempo, en comparación con el enfoque tradicional. Estudios comparativos han mostrado que la estimación de Ht a partir de datos obtenidos mediante sensores LiDAR aerotransportados puede producir errores inferiores a 0,5 m en plantaciones, en concordancia con mediciones instrumentales de campo, lo cual indica una buena capacidad predictiva del modelo y una adecuada calidad de los datos utilizados (Hawryło et al., 2024; Mauro et al., 2011; Sparks et al., 2024).

5.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS DE ESTIMACIÓN DE DAP PARA LOS ENSAYOS CLONAL Y SEMINAL

La correlación positiva observada entre el MDV máximo y el DAP en ambos ensayos ($r = 0,86$ en clonal y $0,88$ en seminal) evidencia una relación consistente entre ambas variables, respaldando el uso de métricas LiDAR como predictores del DAP en árboles no medidos a campo. En un trabajo de Maltamo et al. (2014) en bosques de Finlandia, se obtuvieron correlaciones elevadas entre métricas LiDAR basadas en percentiles de altura y el DAP, con valores de r en el entorno de $0,80-0,90$, dependiendo del tipo de bosque y de las variables predictoras utilizadas.

Por su parte el valor de R^2 obtenido ($0,73$ en clonal y $0,78$ en seminal) refleja que una proporción importante de la variabilidad del DAP es explicada por el MDV máximo. En un estudio realizado por Dos Santos Villegas (2023) en Uruguay, se empleó un sensor LiDAR montado en un dron para la caracterización de rodales jóvenes de *Eucalyptus* de 1 año. Los resultados, obtenidos a partir de modelos de regresión lineal simple, permitieron estimar variables dasométricas con un nivel de error considerado aceptable. En particular, las regresiones evidenciaron una alta correspondencia entre las variables medidas en campo y las estimadas a partir de datos LiDAR, alcanzando coeficientes de determinación de $R^2 = 0,76$ para el DAP. No

obstante, en ambos ensayos, el ajuste obtenido para la estimación de la correlación y el valor de R^2 resulta inferior al de la Ht, lo cual es esperable debido a la mayor variabilidad estructural del diámetro y su relación menos directa con métricas derivadas de datos LiDAR aerotransportados, que tienden a representar con mayor precisión atributos como la altura (Maltamo et al., 2014; Popescu et al., 2003). El LiDAR aerotransportado obtiene con gran precisión las características relacionadas con la copa de los árboles, aunque presenta limitaciones para caracterizar directamente el fuste, por lo que las estimaciones de DAP y ubicación son menos fiables debido a la configuración del escaneo aéreo (Ortiz-Reyes et al., 2015; Xiang et al., 2024). En consecuencia, la estimación del DAP se realiza de forma indirecta, aprovechando su relación funcional con la altura mediante curvas hipsométricas y modelos predictivos basados en métricas LiDAR, un enfoque ampliamente reportado en la literatura (Bouvier et al., 2015; Næsset, 2004; Yu et al., 2011).

El RMSE obtenido para el DAP (0,73 cm en clonal y 0,59 cm en seminal) refleja un bajo error en relación con el rango de diámetros observados, evidenciando una adecuada capacidad predictiva del modelo y una buena calidad de los datos empleados. En plantaciones forestales de mayor edad, diversos estudios han reportado valores de RMSE comprendidos entre 2 y 4 cm en la estimación del DAP a partir de atributos del dosel (como el MDV max) obtenidos mediante LiDAR aerotransportado (Breidenbach et al., 2008; Maltamo et al., 2014; Popescu et al., 2003), lo que resalta la solidez de los resultados obtenidos en el presente estudio. En un trabajo de Tantrairatn et al. (2025) reportaron un RMSE de 0,537 cm en la estimación del DAP en plantaciones jóvenes de *Hevea brasiliensis*, en concordancia con los valores obtenidos en este trabajo, lo que refuerza el potencial de la tecnología LiDAR para caracterizar con precisión la estructura del rodal.

5.3. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE TRATAMIENTOS

5.3.1. Ensayo clonal

En el ensayo clonal, las diferencias entre tratamientos resultaron más evidentes. Dentro de cada especie, se observaron contrastes significativos de Ht y DAP entre tratamientos, asociados a los diferentes arreglos espaciales. Esta mayor diferenciación entre tratamientos puede atribuirse a la homogeneidad genética del material clonal (Binkley et al., 2017; Rizzo-Martín et al., 2023; White et al., 2007), lo que permite aislar con mayor claridad el efecto del manejo (número de filas y ancho de callejón) sobre el crecimiento (Binkley et al., 2017). A pesar de tratarse de un ensayo con tres años de edad (plantación aún joven), comienzan a manifestarse procesos de competencia entre árboles vecinos, haciendo más notorias las respuestas a los distintos arreglos espaciales.

En *E. dunnii*, el tratamiento con un mayor número de filas y un menor ancho de callejón (tratamiento 3) presentó valores promedio de Ht y DAP significativamente

superiores. Este comportamiento puede atribuirse a que dicho arreglo se aproxima a la estructura de un sistema forestal puro, caracterizado por una mayor densidad arbórea efectiva y la ausencia de callejones destinados al pastoreo. Las especies del género *Eucalyptus* presentan adaptaciones ecológicas asociadas a su desarrollo en rodales coetáneos, donde la competencia intraespecífica constituye un componente central de su dinámica de crecimiento (Weiskittel et al., 2011). Una mayor densidad relativa dentro del arreglo espacial intensifica la competencia entre individuos, particularmente por la radiación disponible, lo que favorece respuestas morfofisiológicas como el incremento en altura, lo cual constituye una estrategia para acceder al dosel y maximizar la captación lumínica (Binkley et al., 2013; Forrester, 2014; Landsberg & Waring, 1997). Este comportamiento es consistente con estudios silvícolas clásicos que describen los mecanismos de competencia en rodales densos. Por ejemplo, Assmann (1970) y Evans y Turnbull (2004) señalan que *Eucalyptus* spp. presentan una marcada plasticidad fenotípica frente a variaciones en la densidad de plantación, donde mayores densidades estimulan el crecimiento vertical del fuste en detrimento del diámetro. En estudios de espaciamiento en *Eucalyptus* spp. en Brasil, se ha observado que mayores densidades iniciales promueven incrementos en altura y modifican el crecimiento diamétrico en función de la competencia intraespecífica (dos Santos Leles et al., 2001; Stape et al., 2004). En el contexto de SSP, Perrotti (2017) también reporta que arreglos espaciales más compactos pueden intensificar la competencia entre árboles, generando diferencias estructurales apreciables en variables como la Ht, incluso bajo manejos silvícolas similares.

En lo que respecta al DAP, Magalhaes (2003) y Perrotti (2017) sostienen que el crecimiento en diámetro es una variable altamente dependiente del espaciamiento, lo que indica que una mayor disponibilidad de espacio favorece la expresión del crecimiento radial. Sin embargo, en el presente estudio este efecto no se manifestó de manera marcada, lo cual podría estar asociado a la edad temprana de los árboles evaluados. En fases iniciales del desarrollo, la competencia entre individuos aún no alcanza la intensidad suficiente como para generar diferencias significativas en DAP y Ht, siendo esperable que estas se acentúen a medida que el rodal avance hacia etapas de mayor cierre de copas (Assmann, 1970; Rachid-Casnati et al., 2022).

Además de la competencia intraespecífica por la radiación, las diferencias de crecimiento entre los distintos arreglos espaciales también pueden explicarse por la interacción competitiva entre los árboles y la pastura, característica de los SSP. Durante las etapas iniciales, esta competencia puede ser incluso más determinante que la que ocurre entre árboles (Barrios Miller & Pippo Arbelo, 2025), especialmente en arreglos con mayor espaciamiento entre filas, donde la mayor disponibilidad de luz en el estrato inferior favorece el desarrollo de la pastura (Tonini et al., 2024). En estas condiciones, la cobertura herbácea compite más intensamente por recursos como agua y nutrientes superficiales, lo que puede generar una mayor interferencia sobre los árboles jóvenes y contribuir a menores tasas de crecimiento en altura y diámetro en comparación con sistemas de mayor densidad, donde predomina la competencia

intraespecífica y el desarrollo de la pastura es más limitado (Barrios Miller & Pippo Arbelo, 2025; Tonini et al., 2024).

Otra hipótesis que podría explicar las diferencias observadas se vincula con los cambios en la calidad de la luz en plantaciones de mayor densidad. Según Barrios Miller y Pippo Arbelo (2025), la proximidad entre árboles (como ocurre en arreglos de fila triple) puede modificar el espectro lumínico, incrementando la proporción de radiación rojo lejano. Esta señal desencadena respuestas fotomorfogénicas asociadas al alargamiento del tallo. En consecuencia, es esperable que los árboles establecidos en plantaciones más densas presenten mayor altura y menor diámetro, mientras que aquellos dispuestos en filas simples tiendan a desarrollar menor altura y mayor diámetro.

En conjunto, los resultados sugieren que, en *E. dunnii* y en las condiciones evaluadas, el aumento en el número de filas favorece el crecimiento, mientras que un mayor espaciamiento entre filas, cuando no se acompaña de una mayor densidad estructural del arreglo, tiende a asociarse con un menor desempeño. Esto refuerza la idea de que no es únicamente la distancia entre árboles la que determina la respuesta productiva, sino la configuración espacial del sistema en su conjunto.

Para *E. grandis*, el análisis evidenció un comportamiento parcialmente similar al observado en *E. dunnii*. Si bien el tratamiento con mayor número de filas y menor ancho de callejón presentó valores medios superiores de Ht y DAP (tratamiento 7, tabla 5), no presenta diferencias estadísticamente significativas comparado con el tratamiento con una fila y menor ancho de callejón (tratamiento 5, tabla 5). En este sentido, aunque la literatura silvícola indica que el aumento de la densidad puede intensificar la competencia por luz y estimular el crecimiento en altura, mejorando potencialmente la productividad por unidad de superficie (Assmann, 1970; Evans & Turnbull, 2004), en las condiciones evaluadas dicho efecto no se manifestó de manera significativa. Esta respuesta podría estar asociada a la etapa temprana de desarrollo del rodal, en la cual los procesos competitivos aún no alcanzan la intensidad suficiente como para generar diferencias estructurales marcadas entre tratamientos (Weiskittel et al., 2011). Adicionalmente, el origen clonal del material contribuye a una mayor homogeneidad en el crecimiento durante las etapas iniciales del rodal, debido a la uniformidad genética y a la baja intensidad de competencia entre individuos (Gadelha et al., 2015). Esta condición tiende a atenuarse con el desarrollo del rodal, ya que el incremento en el tamaño de los árboles intensifica progresivamente los procesos competitivos por recursos, generando una mayor diferenciación estructural entre individuos, cuyo momento de manifestación depende, entre otros factores, de la especie y de sus características de crecimiento (Nambiar & Sands, 1993).

En general los resultados indicaron que el ancho de callejón ejerció un efecto significativo sobre el crecimiento tanto en *E. dunnii* como en *E. grandis*. Al comparar tratamientos con igual número de filas (1 y 2, 3 y 4, 5 y 6, 7 y 8), los tratamientos (1, 3, 5, y 7) con menor ancho de callejón (9 m) presentaron mayores valores de Ht y

DAP respecto a los tratamientos (2, 4, 6 y 8) con un ancho de callejón más amplio (15 m), diferencias que resultaron estadísticamente significativas. Este resultado sugiere que, en las condiciones evaluadas, una menor distancia entre filas incrementa la intensidad de las interacciones competitivas (principalmente por la radiación) favoreciendo el crecimiento en Ht y DAP.

En contraste, al comparar tratamientos con igual ancho de callejón (2 y 4, 5 y 7, 6 y 8) no se detectaron diferencias significativas atribuibles exclusivamente al número de filas cuando el espaciamiento fue constante, solo encontrándose diferencias entre 1 y 3, de la especie *E. dunnii*. Esto indicaría que para estas especies y en esta etapa de desarrollo, el aumento en el número de filas no tendría efecto significativo sobre un incremento de la Ht y el DAP si no está acompañado por un ancho de callejón reducido, por lo tanto, el ancho de callejón constituye un factor determinante en la configuración del crecimiento.

5.3.2. Ensayo seminal

En el ensayo seminal se detectaron diferencias entre tratamientos dentro de cada especie, aunque de menor magnitud en comparación con el ensayo clonal. Esta menor diferenciación puede explicarse por la variabilidad genética inherente al material proveniente de semilla, la cual incrementa la dispersión en las tasas individuales de crecimiento y reduce la capacidad de los arreglos espaciales para generar respuestas homogéneas a nivel de tratamiento. En este contexto, el efecto de la densidad queda parcialmente enmascarado por la heterogeneidad fenotípica del rodal (Correa et al., 2013; White et al., 2007).

Al analizar cada especie de manera independiente, los tratamientos en triple fila tendieron a presentar los mayores valores de Ht y DAP. Este comportamiento es similar al observado en el ensayo clonal y podría explicarse por el mismo motivo, ya que mayores densidades promueven una competencia temprana por luz, lo que estimula el crecimiento en altura como mecanismo de escape competitivo frente a los árboles vecinos (Binkley et al., 2013; Forrester, 2014; Gabira et al., 2023). Asimismo, la proximidad entre individuos puede contribuir a una ocupación más rápida del sitio y a un uso más eficiente de los recursos disponibles, particularmente en rodales jóvenes donde la competencia aún no ha alcanzado niveles limitantes (West & Smith, 2019).

En *E. grandis*, el efecto del arreglo espacial fue más evidente, observándose una respuesta más clara a la configuración en triple fila, especialmente en el tratamiento 7. Esto indicaría una mayor sensibilidad de la especie a variaciones en densidad y espaciamiento durante la fase inicial de establecimiento. En *E. dunnii*, si bien los tratamientos más densos también mostraron mayores valores medios, las diferencias fueron menos marcadas, lo que podría estar asociado a una mayor variabilidad intraespecífica o a una respuesta fisiológica menos acentuada frente a cambios en la disposición espacial en esta etapa (Binkley et al., 2017).

En términos generales, el tratamiento de una fila y mayor espaciamiento (tratamiento 2), se asoció sistemáticamente con los menores valores de crecimiento dentro de ambas especies, lo que refuerza la idea de que configuraciones más amplias pueden retrasar el cierre del dosel y disminuir la intensidad de la competencia temprana por luz, reduciendo el estímulo al crecimiento en altura.

Considerando que se trata de un rodal joven, los resultados reflejan principalmente dinámicas iniciales de competencia y captura de recursos. Es esperable que, a medida que el rodal evolucione y la competencia por luz, agua y nutrientes se intensifique, puedan modificarse los patrones observados, e incluso revertirse parcialmente las ventajas asociadas a mayores densidades iniciales.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de este estudio confirman el alto potencial de la tecnología LiDAR aerotransportada para la estimación de variables dendrométricas en plantaciones forestales jóvenes, tanto en ensayos clonales como seminales. La fuerte relación observada entre el MDV max y la Ht, junto con los elevados valores de ajuste y bajos errores obtenidos, demuestran que esta métrica permite estimar con gran precisión la altura de árboles individuales, constituyéndose como una herramienta confiable para complementar o sustituir mediciones de campo en inventarios forestales.

En el caso del DAP, si bien los modelos presentaron un menor nivel de ajuste en comparación con la Ht, los resultados obtenidos fueron igualmente satisfactorios y consistentes con la literatura. Esto indica que, a pesar de la relación más indirecta entre las métricas LiDAR y el DAP, es posible lograr estimaciones precisas.

Desde el punto de vista silvícola, el estudio evidencia que la configuración espacial del sistema, particularmente el ancho de callejón, juega un rol clave en el crecimiento de los árboles. En el ensayo clonal, donde la variabilidad genética es menor, se observaron diferencias más marcadas entre tratamientos, lo que permitió identificar con mayor claridad el efecto del manejo sobre la Ht y el DAP. En este contexto, arreglos más densos o con menor ancho de callejón favorecieron el crecimiento, probablemente debido a una mayor competencia por luz que estimula el crecimiento en altura.

En contraste, en el ensayo seminal, la mayor variabilidad genética atenuó las diferencias entre tratamientos, aunque se mantuvo la tendencia de mejor desempeño en configuraciones más intensivas, como las de triple fila. Esto sugiere que, en etapas tempranas, la densidad puede influir positivamente en el aprovechamiento de recursos y en la ocupación del sitio, aunque su efecto puede estar parcialmente enmascarado por la heterogeneidad del material vegetal.

En conjunto, los resultados destacan que no solo la densidad, sino la disposición espacial de los árboles dentro del sistema, determina la respuesta productiva. Asimismo, se confirma que los efectos del ancho de callejón y la competencia son dinámicos y dependientes de la edad del rodal, por lo que su impacto podría modificarse a medida que avance el desarrollo de la plantación.

Finalmente, este trabajo aporta evidencia relevante para la integración de herramientas de teledetección en la gestión forestal, así como para la optimización del diseño de SSP, contribuyendo a mejorar la eficiencia en la toma de decisiones y el manejo sustentable de plantaciones forestales.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alamón, C. (2024, 24 de noviembre). Silvopastoreo: US\$ 450 por hectárea de ingreso. *El País*. <https://rurales.elpais.com.uy/ganaderia/silvopastoreo-us-450-por-hectarea-de-ingreso>
- Alonso Battaglia, C., & De Francisco, H. (2022). *Predicción espacial del área basal del bosque nativo en la cuenca alta del Río Negro* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31902>
- Andersen, H. E., Reutebuch, S. E., & Schreuder, G. F. (2001). Automated individual tree measurement through morphological analysis of a LIDAR-based canopy surface model. En D. Briggs (Coord.), *Proceedings of the 1st International Precision Forestry Symposium* (pp. 11-21). University of Washington.
- Assmann, E. (1970). Structure, increment and yield of stands in relation to silvicultural treatment. En P. W. Davis (Ed.), *The principles of forest yield study* (pp. 207-433). Pergamon Press.
- Barrios Miller, S., & Pippo Arbelo, R. (2025). *Relaciones hídricas en dos especies de Eucalyptus en sistema silvopastoril* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/50983>
- Benítez, V., Santa Cruz, R., Viñoles, C., Posse, J., & Fedrigo, J. (2019). Simulación de sombra para una plantación silvopastoril de eucalipto híbrido según la orientación de plantación: N-S o E-O. En J. Rivera, P. Peri, J. Chará, M. Díaz, L. Colcombet & E. Murgueitio (Eds.), *Actas X Congreso Internacional sobre Sistemas Silvopastoriles: Por una producción sostenible* (pp. 477-478). CIPAV.
- Binkley, D., Campoe, O. C., Alvares, C. A., Carneiro, R. L., Cegatta, Í., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.050>
- Binkley, D., Campoe, O. C., Gspaltl, M., & Forrester, D. I. (2013). Light absorption and use efficiency in forests: Why patterns differ for trees and stands. *Forest Ecology and Management*, 288, 5-13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.002>
- Borsah, A. A., Nazeer, M., & Wong, M. S. (2023). LIDAR-Based forest biomass remote sensing: A review of metrics, methods, and assessment criteria for the selection of allometric equations. *Forests*, 14(10), Artículo e2095. <https://doi.org/10.3390/f14102095>

- Boscana Goires, M. R. (2019). *Efecto del marco de plantación en los resultados productivos y económicos en sistemas silvopastoriles* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31546>
- Bouvier, M., Durrieu, S., Fournier, R. A., & Renaud, J. P. (2015). Generalizing predictive models of forest inventory attributes using an area-based approach with airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 156, 322-334.
- Breidenbach, J., Gläser, C., & Schmidt, M. (2008). Estimation of diameter distributions by means of airborne laser scanner data. *Canadian Journal of Forest Research*, 38(6), 1611-1620. <https://doi.org/10.1139/x07-237>
- Calders, K., Newnham, G., Burt, A., Murphy, S., Raunonen, P., Herold, M., Culvenor, D., Avitabile, V., Disney, M., Armston, J., & Kaasalainen, M. (2015). Nondestructive estimates of above-ground biomass using terrestrial laser scanning. *Methods in Ecology and Evolution*, 6(2), 198-208. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12301>
- Canozzi, M. E. A., Clariget, J. M., Roig, G., Pérez, E., Aznárez, V., Banchemo, G., & La Manna, A. (2022). Shade effect on behaviour, physiology, performance, and carcass weight of heat-stressed feedlot steers in a humid subtropical area. *Animal Production Science*, 62(17), 1692-1705. <https://doi.org/10.1071/AN22128>
- Cardozo Olivera, I. (2023). *Estudio de la regeneración inicial de la vegetación posterior al uso forestal* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/40680>
- Castillo-Gallegos, E., Jarillo-Rodríguez, J., & Escobar-Hernández, R. (2018). Diameter-height relationships in three species grown together in a commercial forest plantation in eastern tropical Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(1), 33-48. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.05.033>
- Centro de Estudios de la Realidad Económica y Social. (2023). *La producción forestal en Uruguay: Un sector líder y sostenible*. https://ceres.uy/admin/uploads/slides/archivo_1699474632.pdf
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., Duque, A., de Trono, E., Fearnside, P. M., Goodman, R. C., Henry, M., Matínez-Yrizar, A., Mugasha, W. A., Muller-Landau, H. C., Mencuccini, M., Nelson, B. W., Ngomanda, A., Nogueira, E. M., Ortiz-Malavassi, E., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190.

- Correa, E., Espitia, M., Araméndiz, H., Murillo, O., & Pastrana, I. (2013). Variabilidad genética en semillas de árboles individuales de *Tectona grandis* L.f. en la conformación de lotes mezclados en Córdoba, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(2), 379-389. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262013000200012
- Dai, W., Guan, Q., Cai, S., Liu, R., Chen, R., Liu, Q., Chen, C., & Dong, Z. (2022). A Comparison of the performances of Unmanned-Aerial-Vehicle (UAV) and terrestrial laser scanning for forest plot canopy cover estimation in *Pinus massoniana* forests. *Remote Sensing*, 14(5), Artículo e1188. <https://doi.org/10.3390/rs14051188>
- Dalla Corte, A. P., Rex, F. E., de Almeida, D. R. A., Sanquetta, C. R., Silva, C. A., Moura, M. M., Wilkinson, B., Zambrano, A. M. A., da Cunha Neto, E. M., Veras, H. F. P., de Moraes, A., Klauberg, C., Mohan, M., Cardil, A., & Broadbent, E. N. (2020). Measuring individual tree diameter and height using GatorEye High-Density UAV-Lidar in an integrated crop-livestock-forest system. *Remote Sensing*, 12(5), Artículo e863. <https://doi.org/10.3390/rs12050863>
- de Macêdo Carvalho, C. B., de Mello, A. C. L., da Cunha, M. V., de Oliveira Apolinário, V. X., Dubeux Júnior, J. C. B., da Silva, V. J., Medeiros, A. S., Izidro, J. L. P. S., & Bretas, I. L. (2024). Ecosystem services provided by silvopastoral systems: A review. *The Journal of Agricultural Science*, 162(5), 417-432. <https://doi.org/10.1017/S0021859624000595>
- Dirección General Forestal. (2024). *Cartografía Nacional Forestal 2024*. MGAP. https://descargas.mgap.gub.uy/Documentos%20compartidos/CARTOGRAFIA%202024/Cartograf%C3%ADa2024_ESP.pdf
- Dogliotti, G., Rizzo, I., Baietto, A., Posse, J. P., Aubet, N., & Gonzalez-Talice, J. (2023). Crown segmentation using Airborne Laser Scanning data in a silvopastoral system with *Eucalyptus grandis*. *Agrociencia Uruguay*, 27(NE2), Artículo e1311. <https://doi.org/10.31285/AGRO.27.1311>
- Domingo Ruiz, D. (2015). *Estimación de variables dasométricas en masas de Pinus halepensis Mill. mediante datos LiDAR y trabajo de campo* [Tesis de maestría, Universidad de Zaragoza]. Zeguan. <https://zaguan.unizar.es/record/47074>
- Dos Santos Villegas, M. (2023). *Determinación de variables dasométricas en rodales de Eucalyptus SP. mediante un sensor LiDAR Zenmuse L1 implementado en un dron DJI Matrice 300* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/54334>

- dos Santos Leles, P. S., dos Reis, G. G., Reis, M. D. G. F., & de Moraes, E. J. (2001). Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. *Scientia Forestalis*, (59), 77-87. <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr59/cap06.pdf>
- Dubayah, R., & Drake, J. (2000). LIDAR remote sensing for forestry. *Journal of Forestry*, 98(6), 44-46. <https://doi.org/10.1093/jof/98.6.44>
- Dunn, K., Unruh Snyder, L., McCarter, J., Frey, G., Idassi, J., Schnake, D., & Cubbage, F. (2021). Bioeconomic assessment of an alley cropping field trial in North Carolina, U.S.: Tree density, timber production, and forage relationships. *Sustainability*, 13(20), Artículo e11465. <https://doi.org/10.3390/su132011465>
- Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000*. MAP. https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/Comunicaciones/1619_carta_de_reconocimiento_de_suelos_del_uruguay_1.1.000.000_imprimir_a0_0.pdf
- Evans, J., & Turnbull, J. W. (2004). *Plantation forestry in the tropics: The role, silviculture, and use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes* (3rd ed.). Oxford University Press.
- Fassnacht, F. E., Latifi, H., Stereńczak, K., Modzelewska, A., Lefsky, M., Waser, L. T., Straub, C., & Ghosh, A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 186, 64-87. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.013>
- Fedrigo, J. K., Benítez, V., Santa Cruz, R., Posse, J. P., Santiago Barro, R., Hernández, J., Mantero, C., Morales Olmos, V., Silveira, E. D., & Viñoles, C. (2018). Oportunidades y desafíos para los sistemas silvopastoriles en Uruguay. *Veterinaria (Montevideo)*, 54(209), 20-30. <https://doi.org/10.29155/vet.54.209.4>
- Forrester, D. I. (2014). The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: From pattern to process. *Forest Ecology and Management*, 312, 282-292.
- Frey, G., Pachas, A., Noellmeyer, E., Balmelli, G., Fassola, H., Colcombet, L., Stevenson, H., Hamilton, J., Hubbard, W., & Cubbage, F. (2009). *Resumen y comparación de los sistemas silvopastoriles en seis regiones del mundo*. Sitio Argentino de Producción Animal. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/manejo%20silvopastoril/137-INTA-resumen-sistemas-silvopastoriles.pdf

- Gabira, M. M., Girona, M. M., DesRochers, A., Kratz, D., Gomes da Silva, R. B., Duarte, M. M., Aguiar, N. S., & Wendling, I. (2023). The impact of planting density on forest monospecific plantations: An overview. *Forest Ecology and Management*, 534, Artículo e120882. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.120882>
- Gadelha, F. H. de L., Aleixo da Silva, J. A., Caraciolo Ferreira, R. L., dos Santos, R. C., & Tavares, J. A. (2015). Produtividade de clones de eucaliptos em diferentes sistemas de manejo para fins energéticos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(83), 263-270. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.83.827>
- Ganz, S., Käber, Y., & Adler, P. (2019). Measuring tree height with remote Sensing- A comparison of photogrammetric and LiDAR data with different field measurements. *Forests*, 10(8), Artículo e694. <https://doi.org/10.3390/f10080694>
- García Pintos Martínez, R. (2021). Sistemas silvopastoriles: Una opción interesante, vigente y apropiada. *Revista del Plan Agropecuario*, (192), 40-42. https://www.planagropecuario.org.uy/uploads/magazines/articles/192_2997.pdf
- Getie, S., Alemayehu, A., & Mekoya, A. (2024). Relevance of remote sensing and its applications in forestry: A critical review. *East African Journal of Forestry and Agroforestry*, 7(1), 87-112. <https://doi.org/10.37284/eajfa.7.1.1818>
- Goncherenko, G., Baez, F., Fedrigo, J., Santa Cruz, R., & Viñoles, C. (2021). Impacto del estrés calórico en la productividad de la cría vacuna. En J. E. Rivera, L. Colcombet, R. Santos-Gally, E. Murgueitio, M. Díaz, R. M. Mauricio, P. Peri & J. Chará (Eds.), *Actas XI Congreso Internacional En Sistemas Silvopastoriles* (pp. 288-299). CIPAV.
- Hawryło, P., Socha, J., Wężyk, P., Ochał, W., Krawczyk, W., Miszczyszyn, J., & Tymińska-Czabańska, L. (2024). How to adequately determine the top height of forest stands based on airborne laser scanning point clouds? *Forest Ecology and Management*, 551, Artículo e121528. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121528>
- Hernández Moreno, J. A., Pérez-Salicrup, D. R., & Velázquez-Martínez, A. (2024). Medición de parámetros de inventario forestal en bosques plantados, mediante tecnología LiDAR: Comparación de métodos. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 16(87), 72-99. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i87.1488>
- Hirigoyen, A., Varo-Martinez, M. A., Rachid-Casnati, C., Franco, J., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2020). Stand characterization of Eucalyptus spp. plantations in Uruguay using airborne LiDAR scanner technology. *Remote Sensing*, 12(23), Artículo e3947. <https://doi.org/10.3390/rs12233947>

- Hirigoyen Domínguez, A. (2021). *Aplicación de imágenes de satélites y datos LiDAR en la modelización e inventario de Eucalyptus spp en Uruguay* [Disertación doctoral, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/31677>
- Huertas, S. M., Bobadilla, P. E., Alcántara, I., Akkermans, E., & van Eerdenburg, F. J. C. M. (2021). Benefits of silvopastoral systems for keeping beef cattle. *Animals*, 11(4), Artículo e992. <https://doi.org/10.3390/ani11040992>
- Ibrahim, M., Villanueva, C., Casasola, F., & Rojas, J. (2006). Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y restauración de la integridad ecológica de paisajes ganaderos. *Pastos y Forrajes*, 29(4), 383-419.
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). *Características climáticas*.
<https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/caracteristicas-climaticas>
- Jensen, J. R. (2007). *Remote sensing of the environment: An Earth resource perspective* (2nd ed.). Pearson.
- Jubanski, J., Ballhorn, U., Kronseder, K., Franke, J., & Siegert, F. (2013). Detection of large above-ground biomass variability in lowland forest ecosystems by airborne LiDAR, *Biogeosciences*, 10(6), 3917-3930.
<https://doi.org/10.5194/bg-10-3917-2013>
- Kamp, N., Krenn, P., Avian, M., & Sass, O. (2023). Comparability of multi-temporal DTMs derived from different LiDAR platforms: Error sources and uncertainties in the application of geomorphic impact studies. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(6), 1152-1175. <https://doi.org/10.1002/esp.5540>
- Keefe, R. F., Zimbelman, E. G., & Picchi, G. (2022). Use of individual tree and product level data to improve operational forestry. *Current Forestry Reports*, 8(2), 148-165. <https://doi.org/10.1007/s40725-022-00160-3>
- Kuchman Robaina, F., Mattos Curbelo, G., & Thevenet Rodríguez, J. A. (2022). *Impacto productivo del acceso a sombra en la parcela de pastoreo de sorgo forrajero tendiente a mitigar el efecto del estrés por calor en novillos Hereford* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/32785>
- Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95(3), 209-228.

- Lefsky, M. A., Cohen, W. B., Parker, G. G., & Harding, D. J. (2002). Lidar remote sensing for ecosystem studies: LiDAR, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, 52(1), 19-30. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0019:LRSFES\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0019:LRSFES]2.0.CO;2)
- Ley n° 13.723. [Ley Forestal] (1968). <https://www.impo.com.uy/bases/leyes-originales/13723-1968>
- Ley n° 15.939: *Ley Forestal - Fondo forestal - Recursos naturales*. (1987). <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/15939-1987>
- Li, W., Guo, Q., Jakubowski, M. K., & Kelly, M. (2012). A new method for segmenting individual trees from the LiDAR point cloud. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(1), 75-84. <https://doi.org/10.14358/PERS.78.1.75>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Lin, Y.-C., Shao, J., Shin, S.-Y., Saka, Z., Joseph, M., Manish, R., Fei, S., & Habib, A. (2022). Comparative analysis of multi-platform, multi-resolution, multi-temporal LiDAR data for forest inventory. *Remote Sensing*, 14(3), Artículo e649. <https://doi.org/10.3390/rs14030649>
- Magalhaes, W. M. (2003). *Desempenho silvicultural de clones e procedências de Eucalyptus em diferentes espaçamentos na região Noroeste de Minas Gerais* [Trabajo final de grado]. Universidade Federal de Lavras.
- Maltamo, M., Næsset, E., & Vauhkonen, J. (Eds.). (2014). *Forestry applications of airborne laser scanning: Concepts and case studies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-8663-8>
- Mauro, F., Valbuena, R., Manzanera, J. A., & García-Abril, A. (2011). Influence of global navigation satellite system errors in positioning inventory plots for tree-height distribution studies. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(1), 11-23. <https://doi.org/10.1139/X10-164>
- Montagnini, F., & Nair, P. K. R. (2004). Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61(1-3), 281-295. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>

- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., & Solorio, B. (2011). Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*, 261(10), 1654-1663.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>
- Næsset, E. (2004). Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(2), 164-179.
- Nambiar, E. K. S., & Sands, R. (1993). Competition for water and nutrients in forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 23(10), 1955-1968.
<https://doi.org/10.1139/x93-247>
- Nessi Darreche, E., & Lustemberg Martínez, G. (2022). *Impacto de la intensidad de laboreo sobre la producción de biomasa en plantaciones forestales próximas a cosecha* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/37234>
- Ordóñez Díaz, J. A. B., Rivera Vázquez, R., Tapia Medina, M. E., & Ahedo Hernández, L. R. (2015). Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 7-16. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i32.95>
- Ortiz-Reyes, A., Valdez-Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., Birdsey, R., & Peduzzi, A. (2015). *LiDAR aerotransportado para el manejo de recursos forestales*. En Y. M. Fernández-Ordóñez, M. J. Escalona-Maurice & J. R. Valdez-Lazalde (Eds.), *Avances y perspectivas de geomática con aplicaciones ambientales, agrícolas y urbanas* (pp. 67-89). Editorial del Colegio de Postgraduados.
https://www.researchgate.net/publication/292966913_LiDAR_Aerotransportado_para_el_Manejo_de_Recursos_Forestales
- Pebesma, E. J. (2018). Simple features for R: Standardized support for spatial vector data. *The R Journal*, 10(1), 439-446.
- Perrotti, E. G. (2017). *Sistema silvopastoril con clones de Eucalyptus grandis* [Trabajo de especialización, Universidad Nacional del Nordeste]. Unne.
<https://repositorio.unne.edu.ar/handle/123456789/1649>
- Plaza, J. (2020, 29 de abril). Forest inventory techniques using drones in Latin America. *Commercial UAV News*.
<https://www.commercialuavnews.com/forestry/forest-inventory-techniques-using-drones-in-latin-america>

- Popescu, S. C., & Wynne, R. H. (2004). Seeing the trees in the forest: Using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 70(5), 589-604.
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Nelson, R. F. (2003). Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), 564-577. <https://doi.org/10.5589/m03-027>
- Popescu, S. C., Wynne, R. H., & Scrivani, J. A. (2004). Fusion of small-footprint lidar and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA. *Forest Science*, 50(4), 551-565.
- Popescu, S. C., & Zhao, K. (2008). A voxel-based LiDAR method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 767-781.
- Porcile Maderni, J. F. (2007). *Crónicas del desarrollo forestal del Uruguay*. Editorial Fin de Siglo. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/cronicas_del_desarrollo_forestal_del_uruguay_ii_0.pdf
- Rachid-Casnati, C., Resquín, F., & Hirigoyen, A. (2022). Introducción al uso del índice de densidad relativa para el manejo poblacional de plantaciones de pinos y eucaliptos para usos sólidos. *Revista INIA*, (71), 117-120. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16945/1/INIA-71-diciembre-2022-Rachid.pdf>
- Rivera, J. E., Viñoles, C., Fedrigo, J., Bussoni, A., Peri, P., Colcombet, L., Murgueitio, E., Quadrelli, A., & Chará, J. (Eds.). (2023). *Sistemas silvopastoriles: Hacia una diversificación sostenible: Actas del XII Congreso Internacional de Sistemas Silvopastoriles y II Congreso de la Red Global de Sistemas Silvopastoriles*. CIPAV. <https://cipav.org.co/wp-content/uploads/2023/10/Actas-XII-Congreso-Internacional-Silvopastoril.pdf>
- Rizzo-Martín, I., Hirigoyen-Domínguez, A., Arthus-Bacovich, R., Varo-Martínez, M. Á., & Navarro-Cerrillo, R. (2023). Site index estimation using airborne laser scanner data in *Eucalyptus dunnii* maide stands in Uruguay. *Forests*, 14(5), Artículo e933. <https://doi.org/10.3390/f14050933>
- Rizzotto, C. (2023). Árboles y ganado: Sinergia que funciona. *Revista Forestal*, 14-20. <https://www.revistaforestal.uy/wp-content/uploads/2023/09/F36-Silvicultura.pdf>

- Ruiz, L. Á., Hermosilla, T., Mauro, F., & Godino, M. (2014). Analysis of the influence of plot size and LiDAR density on forest structure attribute estimates. *Forests*, 5(5), 936-951. <https://doi.org/10.3390/f5050936>
- Saarela, S., Wästlund, A., Holmström, E., Mensah, A. A., Holm, S., Nilsson, M., Fridman, J., & Ståhl, G. (2020). Mapping aboveground biomass and its prediction uncertainty using LiDAR and field data, accounting for tree-level allometric and LiDAR model errors. *Forest Ecosystems*, 7, Artículo e43. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00245-0>
- Sancho, L., Arocena, I., & Ordeig, L. (2021). *Definición, caracterización y cuantificación del área bajo sistemas silvopastoriles, para el seguimiento de las contribuciones establecidas en la Contribución Determinada a nivel Nacional de Uruguay*. MA, MGAP; GEF; PNUD. https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/noticias/informe_final.pdf
- Santos, D. de C., Guimarães Júnior, R., Vilela, L., Maciel, G. A., & França, A. F. de S. (2018). Implementation of silvopastoral systems in Brazil with Eucalyptus urograndis and Brachiaria brizantha: Productivity of forage and an exploratory test of the animal response. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 266, 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.017>
- Schinato, F. (2022). *Evaluación de servicios ambientales en un sistema silvopastoril* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/35851>
- Schowengerdt, R. A. (2006). *Remote sensing: Models and methods for image processing* (3rd ed.). Elsevier.
- Shrestha, R., & Wynne, R. H. (2012). Estimating biophysical parameters of individual trees in an urban environment using small footprint discrete-return imaging LiDAR. *Remote Sensing*, 4(2), 484-508. <https://doi.org/10.3390/rs4020484>
- Singh, S., & Sreevalsan-Nair, J. (2023). Visual exploration of LiDAR point clouds. En S. S. Durbha, J. Sanyal, L. Yang, S. S. Chaudhari, U. Bhangale, U. Bharambe & K. Kurte (Eds.), *Advances in scalable and intelligent geospatial analytics: Challenges and applications* (pp. 223-241). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003270928-16>
- Siri Pérez, P. (2024). *Evaluación de modelos espacio-temporales y herramientas de sensoramiento remoto para mejorar la eficiencia experimental en sistemas forestales* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/44720>

- Sparks, A. M., Corrao, M. V., Keefe, R. F., Armstrong, R., & Smith, A. M. S. (2024). An accuracy assessment of field and airborne laser scanning–derived individual tree inventories using felled tree measurements and log scaling data in a mixed conifer forest. *Forest Science*, 70(3), 228-241.
<https://doi.org/10.1093/forsci/fxae015>
- Stape, J. L., Binkley, D., & Ryan, M. G. (2004). Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 193(1-2), 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.020>
- Tantrairatn, S., Pichitkul, A., Petcharat, N., Karaked, P., & Ariyarat, A. (2025). Evaluating LiDAR technology for accurate measurement of tree metrics and carbon sequestration. *MethodsX*, 14, Artículo e103237.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103237>
- Tonini, H., Moraes Genro, T. C., & Trentin, G. (2024). Associations between tree spacing and features of native grassland grown in silvopastoral systems in Pampa biome. *Ciência Rural*, 54(8), Artículo e20230308.
<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1163761>
- Toth, C., & Józków, G. (2016). Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 22-36.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.004>
- Treitz, P., Lim, K., Woods, M., Pitt, D., Nesbitt, D., & Etheridge, D. (2012). Densidad de muestreo LiDAR para inventarios de recursos forestales en Ontario, Canada. *Remote Sensing*, 4(4), 830-848. <https://doi.org/10.3390/rs4040830>
- Uruguay XXI. (2025). *Sector forestal en Uruguay*.
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/360c13a465dd9ee9bdc985fef09c5d1eff4c7bce.pdf>
- Valbuena-Rabadán, M.-Á., Santamaría-Peña, J., & Sanz-Adán, F. (2016). Estimation of diameter and height of individual trees for *Pinus sylvestris* L. based on the individualising of crowns using airborne LiDAR and the National Forestry Inventory data. *Forest Systems*, 25(1), Artículo e046.
<https://doi.org/10.5424/fs/2016251-05790>
- Vieira Junior, N. A., Evers, J., Vianna, M. dos S., Pedreira, B. C. e, Pezzopane, J. R. M., & Marin, F. R. (2022). Understanding the arrangement of Eucalyptus-Marandu palisade grass silvopastoral systems in Brazil. *Agricultural Systems*, 196, Artículo e103316. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103316>

- Viñoles, C., Fedrigo, J. K., Benítez Gonzalez, V., García, L., & Báez, F. (2022). Avances en el conocimiento sobre sistemas silvopastoriles en Uruguay. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 30(Supl. 1), 43-53.
- Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing*, 4(6), 1519-1543. <https://doi.org/10.3390/rs4061519>
- Watt, M. S., Meredith, A., Watt, P., & Gunn, A. (2013). Use of LiDAR to estimate stand characteristics for thinning operations in young Douglas-fir plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 43, Artículo e18. <https://doi.org/10.1186/1179-5395-43-18>
- Weiskittel, A. R., Hann, D. W., Kershaw, J. A., & Vanclay, J. K. (2011). *Forest growth and yield modeling*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119998518>
- West, P. W., & Smith, R. G. B. (2019). Inter-tree competitive processes during early growth of an experimental plantation of *Eucalyptus pilularis* in sub-tropical Australia. *Forest Ecology and Management*, 451, Artículo e117450. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117450>
- White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T., & Tompalski, P. (2016). *Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review*. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42(5), 619-641. <https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1207484>
- White, J. C., Wulder, M. A., Varhola, A., Vastaranta, M., Coops, N. C., Cook, B. D., Pitt, D., & Woods, M. (2013). A best practices guide for generating forest inventory attributes from airborne laser scanning data using an area-based approach. *Forestry Chronicle*, 89(6), 722-723. <https://doi.org/10.5558/tfc2013-132>
- White, T. L., Adams, W. T., & Neale, D. B. (2007). *Forest genetics*. CABI Publishing.
- Wulder, M. A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, H. O., Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C. W., & Gobakken, T. (2012). LiDAR sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment*, 121, 196-209. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001>
- Xiang, B., Wielgosz, M., Kontogianni, T., Peters, T., Puliti, S., Astrup, R., & Schindler, K. (2024). Automated forest inventory: Analysis of high-density airborne LiDAR point clouds with 3D deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 305, Artículo e114078. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114078>

- Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., & Maltamo, M. (2004). Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90(4), 451-462.
- Yu, X., Hyypä, J., Vastaranta, M., Holopainen, M., & Viitala, R. (2011). Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote sensing*, 66(1), 28-37.
- Yussim Broder, A. E. (2013). *Cuantificación de la extracción de nutrientes por Eucalyptus dunnii en edad de cosecha en suelos del litoral oeste uruguayo* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<https://hdl.handle.net/20.500.12008/1674>
- Zhao, K., Popescu, S., & Nelson, R. (2009). LiDAR remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. *Remote Sensing of Environment*, 113(1), 182-196. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.009>
- Zhou, M., Li, C. & Li, Z. (2025). Extraction of individual tree attributes using ultra-high-density point clouds acquired by low-cost UAV-LiDAR in Eucalyptus plantations. *Annals of Forest Science* 82, Artículo e20.
<https://doi.org/10.1186/s13595-025-01291-w>