

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**CALIDAD DE PLANTINES DE *Eucalyptus smithii* EN FUNCIÓN DEL
TAMAÑO DE TUBETES Y DEL USO DE REGULADORES DE CRECIMIENTO**

por

**Yenifer BARÓN FERREIRA
María del Pilar NICOLETTI GARCÍA**

**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 – Sin Obra Derivada**".



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. For. (Mag.) Franco Schinato

Tribunal:

Ing. For. (Mag.) Franco Schinato

Ing. Agr. (Dr.) Jaime González Talice

Ing. Agr. (Mag.) Matías Nión

Fecha:

23 de abril de 2026

Estudiante:

Yenifer Barón Ferreira

María del Pilar Nicoletti García

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por su apoyo incondicional a lo largo de toda la carrera y durante la realización de este trabajo final de grado.

A nuestros novios, por su paciencia, acompañamiento y comprensión en cada etapa de este proceso.

A nuestros amigos de la vida, que, aun sin estar vinculados a la carrera, siempre estuvieron presentes brindándonos su apoyo y ánimo.

A nuestros amigos y compañeros que nos dio la carrera, por los buenos momentos compartidos, el compañerismo y la motivación constante.

A nuestros compañeros Javier Cardozo, Facundo Sellanes y Rodrigo da Fonseca, por su colaboración y ayuda en las mediciones finales.

A nuestro tutor Franco Schinato y a Matías Mañana, por su apoyo técnico, orientación y dedicación brindada para la realización de este trabajo.

Al equipo de INIA y al vivero Saucedo, por permitirnos llevar adelante la investigación y proporcionarnos las facilidades necesarias para su ejecución.

TABLA DE CONTENIDOS

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivos generales	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	11
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE	11
2.1.1 Morfología y distribución	11
2.1.2 Destino productivo en Uruguay	12
2.1.3 Mortalidad.....	13
2.2 IMPORTANCIA DEL SISTEMA RADICULAR PARA LA PRODUCTIVIDAD.....	13
2.2.1 Arquitectura y morfogénesis del sistema radicular en plantines	14
2.3 HORMONAS VEGETALES Y REGULADORES DEL CRECIMIENTO	16
2.4 PRODUCCIÓN DE PLANTINES EN VIVERO	17
2.4.1 Desde la semilla al plantín: origen, calidad y germinación	18
2.4.2 Operativa de vivero.....	19
2.5 UTILIZACIÓN DE TUBETES Y SU EFECTO	20
2.6 INDICADORES DE CALIDAD	23
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	26
3.2 MATERIAL VEGETAL UTILIZADO Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	29
3.3 EVALUACIÓN DE PLANTINES Y ANÁLISIS DE DATOS.....	32
3.3.1 Indicadores utilizados para evaluar la calidad de los plantines:.....	33
3.3.2 Análisis estadístico	33
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS PLANTINES	35
4.2 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS VARIABLES MORFOLÓGICAS E ÍNDICES DE CALIDAD	38
5. CONCLUSIÓN.....	51
6. BIBLIOGRAFÍA.....	53
7. ANEXOS.....	64

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1	Evaluación morfológica de los plantines a los 99 días post siembra	36
Tabla 2	Evaluación morfológica de los plantines a los 173 días post siembra	38
Tabla 3	Efectos de los tratamientos sobre las variables morfológicas e índices de calidad	39
Figura 1	Distribución natural de <i>E. smithii</i> en Australia.....	12
Figura 2	Cambios morfológicos durante la iniciación y el desarrollo de las raíces laterales	16
Figura 3	Patrón de desarrollo radicular según el tipo de diseño del tubete.....	22
Figura 4	Vivero Saucedo, sobre ruta 8	26
Figura 5	Variación mensual de la temperatura media registrada durante el período del experimento.....	28
Figura 6	Precipitación efectiva promedio mensual durante el período del experimento	29
Figura 7	Plantines luego de la aplicación hormonal.....	30
Figura 8	Registro del PSH como parte de la evaluación morfológica de los plantines	31
Figura 9	Muestras de raíces del T1, antes del proceso de lavado y eliminación del sustrato.....	32
Figura 10	Efecto del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal sobre DC	40
Figura 11	Efecto del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal sobre la altura....	42
Figura 12	PSH, PST, PSR, PSTT en función del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal.....	44
Figura 13	Índice de robustez, en función del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal.....	45
Figura 14	Relación A / R en función del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal	47
Figura 15	Relación PS de hojas / PS de raíces en función del tratamiento hormonal	48
Figura 16	Índice de calidad de Dickson en función del tipo de tubete.....	50

RESUMEN

Eucalyptus smithii se ha consolidado como una especie relevante en el sector forestal uruguayo, principalmente como alternativa a *Eucalyptus globulus*, cuya productividad se vio afectada tras la aparición de *Teratosphaeria nubilosa* en 2007. Además de su adecuado desempeño silvícola, presenta aptitud para la producción de madera y pulpa, así como tolerancia a heladas. Sin embargo, en los últimos años se han registrado episodios de mortandad en las etapas iniciales del cultivo, sin un diagnóstico preciso de sus causas. En este contexto, este estudio evaluó estrategias para mejorar la calidad de plantines destinados al establecimiento en campo, analizando el efecto de reguladores del crecimiento sobre el desarrollo radicular y la influencia del tipo de tubete en vivero. El ensayo se realizó en el vivero Saucedo (Solís de Mataojo, Lavalleja, Uruguay) bajo un diseño completamente al azar con estructura factorial, considerando dos factores: tipo de tubete (tres niveles) y aplicación hormonal (con y sin aplicación), con tres repeticiones por tratamiento. La aplicación hormonal se efectuó vía foliar a los 99 días post siembra, utilizando una solución de ácido naftalenacético (ANA) y aminoetoxivinilglicina (AVG) en concentraciones de 600 mg L⁻¹ y 125 mg L⁻¹, respectivamente. Se evaluaron tres tipos de tubetes diferenciados por su diseño y volumen: tubete grande (325,125 cm³), tubete chico (30,49 cm³) y tubete cuadrado (172,40 cm³). Se realizaron dos evaluaciones morfológicas: al momento de la aplicación sobre una submuestra de plantines de cada tratamiento y a los 173 días post siembra, sobre un total de 342 plantines. En ambas instancias se midieron diámetro de cuello (DC), altura (H), peso seco de hojas (PSH), tallo (PST) y raíces (PSR), calculándose el peso seco total (PSTT) e indicadores de calidad. Los resultados evidenciaron que el tamaño del tubete fue el principal factor determinante del crecimiento y la calidad de los plantines, mientras que el tratamiento hormonal influyó principalmente sobre la asignación de biomasa entre los órganos de los plantines y el equilibrio morfológico. En general, los tubetes de mayor volumen promovieron mayores valores de crecimiento y acumulación de biomasa, en tanto que la aplicación hormonal favoreció una mayor proporción de desarrollo radicular y mejores valores de los indicadores de calidad. El análisis conjunto de las variables morfológicas y los índices de calidad evidenció que un mayor tamaño de planta no necesariamente implica una mejor calidad, destacando la importancia de una evaluación integral en la producción de plantines.

Palabras clave: *Eucalyptus smithii*, calidad de plantines, tubete, reguladores de crecimiento

ABSTRACT

Eucalyptus smithii has become a relevant species within the Uruguayan forestry sector, mainly as an alternative to *Eucalyptus globulus*, whose productivity declined following the emergence of *Teratosphaeria nubilosa* in 2007. In addition to its adequate silvicultural performance, it shows suitability for timber and pulp production, as well as frost tolerance. However, episodes of mortality during the early stages of the crop have been reported in recent years, without a precise diagnosis of their causes. In this context, this study evaluated strategies to improve the quality of seedlings intended for field establishment by analyzing the effect of growth regulators on root development and the influence of container type during the nursery stage. The experiment was conducted at the Saucedo nursery (Solís de Mataojo, Lavalleja, Uruguay) under a completely randomized factorial design, considering two factors: container type (three levels) and hormonal application (with and without application), with three replicates per treatment. The hormonal treatment was applied foliarly 99 days after sowing, using a solution of naphthaleneacetic acid (NAA) and aminoethoxyvinylglycine (AVG) at concentrations of 600 mg L⁻¹ and 125 mg L⁻¹, respectively. Three container types differing in design and volume were evaluated: large container (325.125 cm³), small container (30.49 cm³), and square container (172.40 cm³). Two morphological evaluations were performed: at the time of application on a subsample of seedlings from each treatment, and at 173 days after sowing, including a total of 342 seedlings. In both evaluations, root collar diameter (RCD), height (H), leaf dry weight (LDW), stem dry weight (SDW), and root dry weight (RDW) were measured, and total dry weight (TDW) and quality indices were calculated. Results showed that container size was the main factor determining seedling growth and quality, whereas the hormonal treatment mainly influenced biomass allocation among seedling organs and morphological balance. In general, larger containers promoted greater growth and biomass accumulation, while hormonal application favored a higher proportion of root development and improved quality indicators. The joint analysis of morphological variables and quality indices demonstrated that larger plant size does not necessarily imply better quality, highlighting the importance of an integrated evaluation in forest seedling production.

Keywords: *Eucalyptus smithii*, seedling quality, container type, plant growth regulators

1. INTRODUCCIÓN

El sector forestal uruguayo ha mostrado un crecimiento sostenido en las últimas décadas, consolidándose como uno de los principales rubros productivos del país. En este contexto, el género *Eucalyptus* ocupa un rol central, destacándose *Eucalyptus smithii* (*E. smithii*) por su buena adaptación a diversas condiciones edafoclimáticas, su aptitud para la producción de pulpa de celulosa y su creciente relevancia dentro de la forestación nacional. La superficie plantada con esta especie pasó de aproximadamente 7.200 ha en 2019 a 14.065 ha en 2024, reflejando su rápida expansión (Dirección General Forestal [DGF], 2025; Rachid et al., 2021). En paralelo, la producción de plantines de *E. smithii* en vivero ha aumentado de forma sostenida, alcanzando en 2021 más de 11 millones de plantas, lo que representó el 7,6 % del total nacional (DGF, 2022).

La expansión de *E. smithii* se encuentra estrechamente asociada a su uso como alternativa productiva frente a *Eucalyptus globulus*, cuya superficie plantada ha disminuido debido a su elevada susceptibilidad a la enfermedad foliar causada por *Teratosphaeria nubilosa* (Rachid et al., 2021). No obstante, desde el establecimiento de las primeras plantaciones comerciales de *E. smithii* en Uruguay se han reportado elevados niveles de mortalidad durante los primeros años del ciclo productivo, con valores que pueden alcanzar entre 30 y 40 %, fenómeno conocido como “muerte súbita” (De Benedetti & Freire, 2019; Rachid et al., 2021). Si bien las causas aún no han sido claramente determinadas, se plantea que responden a una interacción de factores climáticos, edáficos, bióticos y de manejo, destacándose la importancia de la calidad inicial del plantín para mejorar el éxito del establecimiento en campo (Rachid et al., 2021).

El sistema radicular constituye un factor determinante en la supervivencia y el crecimiento inicial de las plántulas, dado su rol en la absorción de agua y nutrientes y en el anclaje estructural de la planta (Grossnickle, 2005; Grossnickle & Ivetić, 2022). Las prácticas de manejo en vivero influyen directamente sobre la conformación y funcionalidad del sistema radicular, condicionando la respuesta de las plantas frente al estrés post-trasplante. En este sentido, tanto el uso de reguladores de crecimiento como el diseño de los tubetes empleados en la producción de plantas adquieren especial relevancia (Grossnickle, 2005; Grossnickle & Ivetić, 2022; Landis et al., 1990, 2014).

Las hormonas vegetales, en particular la auxina, cumplen un papel central en la regulación del desarrollo y la arquitectura del sistema radicular, promoviendo la formación de raíces laterales y modulando la asignación de biomasa (Casimiro et al., 2001; Fukaki & Tasaka, 2009; Jing & Strader, 2019; Overvoorde et al., 2010). Estudios recientes señalan que la aplicación de reguladores de crecimiento en vivero puede mejorar las relaciones morfológicas y los índices integrados de calidad, favoreciendo un equilibrio adecuado entre la parte aérea y el sistema radicular sin comprometer el crecimiento en altura (Bolaño Méndez et al., 2023).

Por otra parte, el tipo de tubete utilizado influye directamente sobre la arquitectura inicial del sistema radicular, debido a la plasticidad del crecimiento de las raíces. Características como el volumen, la profundidad y la forma del contenedor condicionan el desarrollo radicular, el vigor de las plantas y su desempeño posterior en campo (Landis et al., 1990, 2014; Sutton, 1969, 1980). El uso de contenedores

inadecuados puede generar malformaciones radiculares que afectan negativamente la absorción de recursos y el establecimiento de las plantas (Mafia et al., 2005).

La calidad de los plantines forestales no debe evaluarse a partir de variables aisladas, sino mediante el uso de indicadores integrados que permitan interpretar de forma conjunta la robustez y el equilibrio en la asignación de biomasa (Fonseca et al., 2002; Grossnickle & MacDonald, 2018). En este marco, el índice de calidad de Dickson, junto con otros índices morfológicos como el índice de robustez (HD) y la relación biomasa aérea/raíz, se presentan como herramientas útiles para la evaluación de la calidad de planta y la toma de decisiones en vivero (Caldeira et al., 2012; May, 1984).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto del tamaño del tubete y la aplicación de reguladores de crecimiento sobre la calidad de plantines de *Eucalyptus smithii* producidos en vivero, aportando información técnica que contribuya a optimizar los procesos de producción y a mejorar el establecimiento de esta especie de creciente importancia para la forestación uruguaya.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos generales

Evaluar el efecto del tamaño del tubete y la aplicación de reguladores de crecimiento sobre el desarrollo radicular de plantines de *Eucalyptus smithii* provenientes de semilla, con el fin de contribuir a la mejora en la calidad de planta producida en vivero.

1.1.2 Objetivos específicos

a) Evaluar el efecto de tubetes y aplicaciones hormonales sobre la morfología, biomasa e indicadores de calidad en plantas al momento de la expedición al campo;

b) Determinar tratamientos que optimicen la calidad de las plantas de *E.smithii*, con potencial para ser incorporados en viveros comerciales.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESPECIE

2.1.1 Morfología y distribución

Según Boland et al. (2006) *Eucalyptus smithii* es un árbol de gran porte y de interés para la producción forestal en zonas de clima templado. Boland et al. (2006) afirma que en ambientes óptimos puede alcanzar entre 40 y 45 metros de altura y diámetros a la altura del pecho (DAP) de hasta 1,5 metros, desarrollando un fuste largo, recto y bien conformado. En sitios marginales, su crecimiento se ve reducido a valores entre 10 y 20 metros, con fustes más cortos y ramificación densa (Boland et al., 2006). El fuste presenta una corteza persistente, áspera, de color castaño oscuro, con fisuras longitudinales finas o superficie rugosa, que se desprende en largas fajas colgantes, un rasgo distintivo de la especie (Brussa, 1994).

Brussa (1994) señala que las hojas juveniles son opuestas, sésiles, lanceoladas o ampliamente lanceoladas, muy aromáticas y discoloras, mientras que las hojas intermedias son subopuestas, pecioladas y también lanceoladas. Las hojas adultas son alternas, pecioladas, angostamente lanceoladas, con nervaduras secundarias oblicuas y de color verde uniforme (concoloras); toda la copa presenta un follaje de textura media y fuertemente aromático (Brussa, 1994). Boland et al. (2006) y Brussa (1994) coinciden en que la floración ocurre entre enero y marzo, con inflorescencias axilares simples, de siete flores por grupo. Los botones florales son obovoides, con opérculo hemisférico y más corto que el hipantio. Los frutos son subglobosos a globosos, con disco convexo y 3 a 4 valvas prominentes (Boland et al., 2006; Brussa, 1994).

Brussa (1994) describe que la distribución natural de *E. smithii* se encuentra en el sureste de Australia, entre los 34° y 37°30' de latitud sur, tanto en zonas costeras como continentales, desde el nivel del mar hasta los 1.100 metros de altitud. Se desarrolla en climas templados a templado-fríos, con temperaturas máximas promedio entre 22 y 28 °C, mínimas entre -2 y 6 °C, y hasta 60 heladas anuales. Las precipitaciones son mayormente uniformes, y oscilan entre 750 y 1.700 mm anuales (Brussa, 1994).

Figura 1
Distribución natural de *E. smithii* en Australia



Nota. Tomado de Boland et al. (2006).

2.1.2 Destino productivo en Uruguay

La expansión de *E. smithii* en Uruguay ha sido notoria en los últimos años. En 2019, el área establecida alcanzaba unas 7.200 hectáreas (Rachid et al., 2021), mientras que en 2024 la superficie plantada prácticamente se duplicó, llegando a 14.065 hectáreas a nivel nacional (DGF, 2025). La producción de plantines de *E. smithii* ha mostrado un crecimiento sostenido en los últimos años, consolidándose como una de las principales especies propagadas por semilla en Uruguay. Según datos de la DGF (2022), en el año 2021 se produjeron 11.433.050 plantines, representando un incremento del 35 % en comparación con el año 2020, donde se alcanzaron 8.484.141 plantines. Esta tendencia positiva refleja su creciente protagonismo dentro del sector forestal nacional. Ese mismo año, representó el 7,6 % del total de plantines forestales producidos en Uruguay, de acuerdo con lo declarado por los viveros nacionales, lo que confirma su consolidación como una especie clave dentro de los sistemas forestales orientados a la producción de pulpa de celulosa (DGF, 2022). Esta evolución confirma el creciente protagonismo de *E. smithii* dentro del sector forestal nacional.

La expansión de *E. smithii* está estrechamente vinculada a su rol como alternativa productiva frente a *Eucalyptus globulus*, cuya superficie plantada ha disminuido significativamente debido a su alta susceptibilidad a la enfermedad foliar causada por *Teratosphaeria nubilosa*, detectada en el país en 2007 (Rachid et al., 2021). Ambas especies presentan características productivas similares, como buen crecimiento y elevado rendimiento pulpable, lo que mantiene el acceso al mercado externo y, además, presenta mayor productividad por hectárea (Rachid et al., 2021).

A partir de evaluaciones en diferentes sitios y edades, se ha observado una alta variabilidad en la productividad de *E. smithii*, alcanzando en algunos casos 35m³/ha/año

(Rachid et al., 2021). Además de su rendimiento, esta especie se considera interesante desde el punto de vista de la calidad de la madera, ya que presenta propiedades tecnológicas similares a las de *E. globulus*, con altos valores de densidad, entre 521 y 617 kg/m³ y rendimiento pulpable, entre 45 y 55 %. A esto se suma su alta capacidad de rebrote y una moderada tolerancia a las heladas (Rachid et al., 2021).

2.1.3 Mortalidad

Desde que se iniciaron las plantaciones de *E. smithii* en Uruguay, se ha reportado una elevada incidencia de árboles que presentan síntomas de marchitamiento y muerte en los primeros años del ciclo productivo (De Benedetti & Freire, 2019). Los síntomas observados a campo incluyen un progresivo amarillamiento seguido de enrojecimiento de la copa, sin defoliación de las ramas, lo cual se asocia frecuentemente a problemas radiculares. En este contexto se destacan la presencia de podredumbres en la base del tallo y raíces, así como deformaciones en el desarrollo del sistema radicular (De Benedetti & Freire, 2019).

Los niveles de mortalidad reportados por *E. smithii*, son variables, alcanzando valores entre el 30 y 40% en muchos casos, concentrándose en los primeros años de las plantaciones (Rachid et al., 2021). Esta mortalidad se manifiesta de forma súbita (en un lapso aproximado de dos semanas), razón por la cual la patología ha sido denominada “muerte súbita”. Las causas de la problemática aún no han sido claramente determinadas, aunque se plantea que estarían asociadas a una combinación de factores climáticos, edáficos, de manejo y bióticos (Rachid et al., 2021). En este sentido, estudios realizados en Sudáfrica han documentado elevadas tasas de mortalidad en *E. smithii* asociadas a podredumbre de raíces provocada por *Phytophthora* spp., especialmente en sitios con tendencia a la acumulación de agua (Rachid et al., 2021).

Estudios confirman que *P. cinnamomi* tiene un rol central en la patogenicidad sobre *E. smithii*, afectando la estructura de raíces finas y provocando síntomas como marchitez foliar, clorosis y muerte regresiva. Las infecciones ocurren con rapidez en suelos saturados, particularmente en sitios mal drenados, y resultan en el colapso de tejidos corticales y reducción del sistema radicular funcional (Linde et al., 1994).

2.2 IMPORTANCIA DEL SISTEMA RADICULAR PARA LA PRODUCTIVIDAD

El desarrollo del sistema radicular constituye un factor determinante para el establecimiento de las plántulas en proyectos de restauración forestal. Las prácticas implementadas en vivero influyen de manera directa sobre la calidad morfológica y fisiológica de las raíces, lo que repercute en su capacidad de adaptación en condiciones de campo (Grossnickle & Ivetić, 2022). Un sistema radicular bien desarrollado y funcional es fundamental para el éxito del trasplante (Grossnickle, 2005), ya que permite una adecuada absorción de agua y nutrientes, además de brindar soporte estructural a la plántula.

La nutrición se considera un atributo fundamental de las plántulas desde la perspectiva de que la acumulación de reservas de nutrientes puede favorecer su rendimiento en campo (Grossnickle & Ivetić, 2022). Por lo tanto, las plántulas con un estado nutricional adecuado tienen el potencial de desarrollar un buen sistema radicular

después de la plantación, lo que incrementa su capacidad para absorber agua y nutrientes del suelo circundante. (Grossnickle & Ivetić, 2022). El entorno del sitio de plantación también desempeña un papel esencial, dado que la respuesta fisiológica de la plántula a las condiciones ambientales influye directamente en su rendimiento en campo (Grossnickle, 2000, 2005; Burdett, 1990, Margolis & Brand, 1990, como se citan en Grossnickle & Ivetić, 2022).

En la mayoría de las condiciones de plantación, las plántulas enfrentan distintos tipos de estrés, cuyo impacto puede atenuarse mediante el uso de plantines de alta calidad y la aplicación de prácticas adecuadas de establecimiento. Diversos autores señalan que la calidad morfofisiológica de los plantines está estrechamente relacionada con su desempeño inicial en campo, ya que determina la capacidad de las plántulas para soportar el estrés y reiniciar rápidamente el crecimiento radicular tras la plantación (Grossnickle, 2005; Villar-Salvador et al., 2012). Características como una buena relación parte aérea/raíz, un sistema radicular bien desarrollado y reservas fisiológicas suficientes se asocian a mayores tasas de supervivencia y mejor crecimiento inicial. A su vez, la preparación adecuada del sitio y la correcta técnica de plantación contribuyen a reducir la falta de contacto raíz-suelo, minimizar el estrés hídrico inicial y facilitar la conexión del sistema radicular con el agua disponible en el suelo. En este sentido, el establecimiento exitoso depende de la interacción entre la calidad de los plantines, las condiciones del sitio y el manejo durante la plantación, siendo el vínculo entre el crecimiento radicular y el establecimiento un factor clave en los programas de reforestación (Grossnickle, 2005).

La combinación del desarrollo radicular tras la plantación y las condiciones ambientales del sitio de restauración forestal determina si las plántulas experimentan estrés de plantación o pasan directamente a la fase de establecimiento. Esta fase ocurre cuando las plántulas logran acoplarse plenamente al ciclo hidrológico y el sitio ha sido preparado mediante prácticas silvícolas para reducir la competencia (Grossnickle, 2000).

Es necesario comprender las capacidades biológicas de una plántula en relación con las condiciones ambientales del sitio, tomar decisiones acertadas sobre la selección de portainjertos en función de las condiciones del sitio, considerar las prácticas culturales y seleccionar la mejor época de siembra para maximizar su capacidad de establecimiento (Grossnickle & Ivetić, 2022).

2.2.1 Arquitectura y morfogénesis del sistema radicular en plantines

El tamaño y la proporción de biomasa vegetal asignada a los sistemas radiculares influyen en la supervivencia de las plántulas y en el equilibrio entre la absorción de agua por parte de las plántulas y su capacidad de evapotranspiración (Grossnickle, 2012; Sheridan & Davis, 2021).

Los sistemas radiculares de los plantines varían significativamente según el método de propagación, ya sea por semilla o por vía vegetativa. Según Hartmann et al. (1990), los plantines originados por semillas presentan un sistema radicular estructurado de manera distinta al de aquellos obtenidos por propagación vegetativa. En las plantas provenientes de semilla, el sistema radicular está compuesto por una raíz principal (o

pivotante), claramente definida y con fuerte respuesta gravitrópica, junto con raíces primarias laterales, de las cuales se desarrollan raíces secundarias y, a su vez, raíces terciarias (Sasse & Sands, 1997).

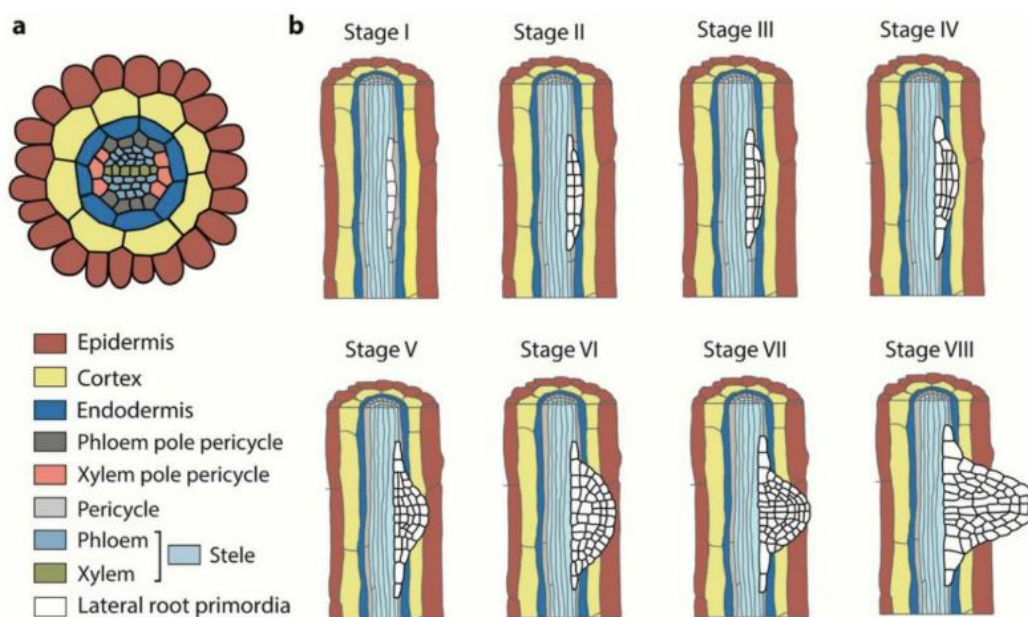
Dentro de esta estructura jerárquica, las raíces que emergen directamente de la raíz pivotante se denominan raíces primarias y pueden clasificarse en dos tipos, según su ubicación y comportamiento de crecimiento. De acuerdo con Sasse y Sands (1997), las raíces primarias tipo A se desarrollan en la zona superior de la raíz principal, dentro de los primeros dos centímetros desde el cuello del plantín. Estas raíces presentan un crecimiento marcadamente diagravitrópico y forman una red densa en las capas superficiales del suelo. Por otro lado, las raíces primarias tipo B se originan a lo largo del resto de la raíz pivotante, son más finas, se disponen con mayor separación entre sí y exhiben un patrón de crecimiento plagio gravitrópico.

En estrecha relación con las raíces primarias, la formación de raíces laterales constituye un proceso organogénico fundamental que determina la arquitectura del sistema radical en las plantas superiores (Fukaki et al., 2007). Este patrón de desarrollo es altamente complejo y está regulado de manera precisa, ya que cumple un rol esencial en la eficiencia de absorción de agua y nutrientes del suelo (Ivanchenko et al., 2008). Además, las raíces laterales emergen a través de los tejidos de la raíz madre, se alargan y se ramifican, lo que permite a las plantas expandir su sistema radicular y explorar mayores volúmenes de suelo (Malamy, 2009).

Desde un punto de vista morfogenético, estas raíces se desarrollan a partir de la capa celular interna de las raíces parentales en el periciclo (ya sean raíces primarias, laterales preexistentes o raíces adventicias) constituyendo órganos postembrionarios. Generalmente, la primera raíz lateral se origina en la raíz primaria poco después de la germinación (Fukaki et al., 2007), marcando el inicio de un patrón de ramificación que influye decisivamente en el desempeño fisiológico de la planta.

Figura 2

Cambios morfológicos durante la iniciación y el desarrollo de las raíces laterales



Nota. (a) Representación esquemática de una sección transversal de la raíz primaria de *Arabidopsis thaliana*. (b) Ocho estadios de iniciación y desarrollo de raíces laterales. Tomado de Jing y Strader (2019).

Las señales ambientales, en este contexto, parecen ejercer un papel diferenciado en las etapas de iniciación y emergencia de las raíces laterales, contribuyendo así a una distribución espacial más eficiente (Malamy, 2009).

2.3 HORMONAS VEGETALES Y REGULADORES DEL CRECIMIENTO

Estudios fisiológicos y genéticos han revelado el papel fundamental de diversas hormonas vegetales en la formación de raíces laterales, destacándose la auxina y la citoquinina como reguladores clave en la iniciación y desarrollo de estos órganos (Jing & Strader, 2019). La auxina, reconocida como un potente regulador del desarrollo radicular, desempeña funciones cruciales en el control del desarrollo y la arquitectura del sistema radicular (Olatunji et al., 2017; Overvoorde et al., 2010). Además de su rol central en la formación de raíces laterales, también interviene en múltiples procesos del desarrollo vegetal, como la embriogénesis, las respuestas trópicas, la dominancia apical, la formación vascular y la organogénesis de brotes y raíces adventicias (Woodward & Bartel, 2005). Procesos como la biosíntesis de auxina, el transporte polar y la transducción de señales resultan esenciales para promover el desarrollo de raíces laterales (Sun et al., 2017). Diversos estudios han confirmado que la auxina, como hormona vegetal, tiene un papel central en la promoción de la iniciación de las raíces laterales y el desarrollo de sus primordios (Fukaki & Tasaka, 2009). En particular, la aplicación exógena de auxina estimula las divisiones celulares en el pericycle (Laskowski et al., 1995), mientras que los inhibidores del transporte de auxina, como NPA (ácido 1-naftilftalámico), bloquean la división celular *de novo* en esta zona durante la iniciación

de las raíces laterales (Casimiro et al., 2001), evidenciando que la auxina regula positivamente estas divisiones celulares en *Arabidopsis*.

El ácido indolacético (AIA), principal forma activa de auxina, es sintetizado en los brotes (especialmente en hojas jóvenes) y transportado hacia el ápice radicular a través de los tejidos vasculares mediante transporte acrópeto. Posteriormente, el AIA es redirigido hacia la base de la raíz mediante las capas celulares externas por transporte basípeto (Morris et al., 2010). Además, el AIA también se biosintetiza en el ápice radicular y en las raíces laterales emergentes (Ljung et al., 2005). Los análisis fisiológicos con inhibidores del transporte de auxinas han demostrado que tanto el sistema de transporte acrópeto como el basípeto son esenciales para la formación de raíces laterales (Casimiro et al., 2001; Reed et al., 1998).

Por su parte, la fitohormona citoquinina actúa como otro regulador central en el desarrollo de las raíces laterales (Laplaze et al., 2007; Marhavý et al., 2014). La citoquinina antagoniza la respuesta a la auxina promoviendo la degradación de proteínas PIN y afectando el transporte polar de auxina, modulando así la formación de raíces laterales (Marhavý et al., 2011, 2014). En consecuencia, la auxina influye en los procesos de biosíntesis y degradación de citoquininas para regular la iniciación de las raíces laterales (Jing & Strader, 2019).

Por último, el etileno inhibe la iniciación de raíces laterales actuando en la punta de la raíz primaria en crecimiento, aunque a concentraciones muy bajas puede promover esta iniciación (Ivanchenko et al., 2008). Así mismo, se ha evidenciado que el etileno inhibe la elongación celular en las raíces que se forman bajo su presencia, sin afectar la longitud de las regiones radiculares donde las células ya han completado la formación de la pared celular antes del aumento en los niveles de etileno (Le et al., 2001).

Según Bolaño Méndez et al. (2023), la aplicación de reguladores de crecimiento es una alternativa que pueden tener al alcance los viveros forestales, ya que es una actividad de fácil implementación en los viveros y presenta potencial para mejorar las relaciones morfológicas y la calidad de los plantines, especialmente en plantas con calidad variable.

La combinación de reguladores, en concentraciones de ANA (ácido naftalenacético) 600 mg L^{-1} y AVG (aminoetoxi-vinil-glicina) 125 mg L^{-1} , se destacó como un tratamiento intermedio prometedor, al alcanzar el mayor índice de calidad de Dickson (ICD) tanto en la segunda medición como en la evaluación final, cercana al momento del despacho. Además, mostró estabilidad en los demás parámetros evaluados. Aunque mejoró el desarrollo radicular respecto al testigo, mantuvo un equilibrio adecuado entre la parte aérea y subterránea, sin comprometer el crecimiento en altura (Bolaño Méndez et al., 2023).

2.4 PRODUCCIÓN DE PLANTINES EN VIVERO

La producción de plantines en vivero implica comprender cómo el desarrollo radicular se adapta a las características del medio de cultivo. El sistema radicular responde a las propiedades fisicoquímicas del sustrato y se ajusta dinámicamente a las condiciones presentes en los tubetes (Kul et al., 2020). En este contexto, las prácticas

de manejo aplicadas en vivero influyen significativamente en la arquitectura de las raíces y, en consecuencia, en el desempeño de las plantas en campo. Esta respuesta se explica por la plasticidad morfogénica del sistema radicular, que permite a las raíces modificar su estructura en función del entorno (Sutton, 1969, 1980).

Esta etapa constituye un eslabón clave dentro de los programas de forestación y reforestación, ya que de ella depende la calidad del material que se establecerá en campo. Un vivero es un espacio acondicionado para la germinación, crecimiento y cuidado de plantas forestales hasta alcanzar la edad adecuada para ser trasplantadas (Piñuela et al., 2013). La producción de plántulas en vivero comprende una secuencia de etapas interdependientes, que van desde la preparación de sustratos hasta el manejo de plántulas listas para la plantación. Las distintas etapas que conforman este proceso son determinantes para garantizar que las plántulas obtenidas alcancen los estándares de calidad requeridos, lo cual resulta decisivo para optimizar tanto su sobrevivencia como su rendimiento en el sitio de plantación (Landis et al., 1989). Cada una de estas fases puede realizarse de manera manual, aunque la decisión sobre el grado de mecanización y los requerimientos de equipo dependen directamente del tamaño, la complejidad del vivero y los recursos disponibles (Landis et al., 1995).

2.4.1 Desde la semilla al plantín: origen, calidad y germinación

Una vez seleccionada la especie forestal a implantar, el paso siguiente en el proceso de planificación debe ser la elección de la fuente de semilla más adecuada, dependiendo del sitio a forestar, así como también el objetivo productivo. En el caso de las especies pertenecientes al género *Eucalyptus*, las principales fuentes de provisión de semillas a nivel mundial se concentran en Australia (principalmente desde poblaciones naturales), por la posibilidad de acceder a material es con mayor diversidad genética, o programas de mejoramiento genético avanzados, con materiales domesticados y con ganancias genéticas garantizada. A nivel nacional, es posible acceder a semilla proveniente de huertos semilleros, áreas específicas de producción o colectas realizadas en plantaciones comerciales (Balmelli et al., 2001). En Uruguay, los programas de mejoramiento genético forestal han generado semilla mejorada para distintas especies de eucalipto; sin embargo, la producción y disponibilidad de este material se ha concentrado principalmente en *Eucalyptus grandis*, debido a su elevada demanda en el sector forestal (Proyectos, s.f.). En todos los casos, resulta fundamental que los árboles semilleros seleccionados presenten características fenotípicas adecuadas, como copas equilibradas, tallos rectos, buen crecimiento y sanidad, ya que de ello depende la obtención de semilla de calidad (Piñuela et al., 2013). La elección correcta de la procedencia es clave para asegurar una buena adaptación al sitio y alcanzar los rendimientos esperados (Balmelli et al., 2001).

La reproducción sexual da origen a nuevas plantas que se desarrollan inicialmente a partir del embrión contenido en la semilla, el cual se forma a partir del óvulo. Una vez madura, la semilla actúa como la unidad responsable de la dispersión de la especie (Vernengo, 2000). Para que estas semillas logren convertirse en nuevas plantas, deben atravesar el proceso de germinación, mediante el cual pasan de un estado de latencia a una fase activa de metabolismo, lo que permite la emergencia de la plántula (Vernengo, 2000). Este proceso inicia con la imbibición o absorción de agua, que activa el metabolismo interno y moviliza las reservas nutritivas necesarias,

culminando con la emergencia de la radícula a través de las cubiertas seminales, lo que marca el inicio del desarrollo de la plántula (Pita Villamil & Pérez García, 1998).

2.4.2 Operativa de vivero

La elección del tubete reviste un papel central, ya que no solo condiciona el diseño del área de propagación y el tipo de mesas porta bandejas, sino también la selección de equipos de producción y de manejo. En el caso de viveros que producen bajo contrato, es común que se trabajen especificaciones técnicas establecidas por el cliente, e incluso algunos contratistas proporcionan directamente los contenedores a utilizar. Por ello, la selección adecuada del tipo de tubete se considera uno de los elementos más críticos en la planificación y desarrollo de un vivero moderno (Landis et al., 1990).

El manejo de un vivero para que tenga éxito debe contar con una organización estructurada, que asegure la asignación de responsabilidades y la correcta ejecución de los trabajos (Landis et al., 1995). El manejo operativo en vivero es una etapa fundamental para asegurar la producción de plántulas forestales de alta calidad, que garanticen una adecuada sobrevivencia y desarrollo posterior a la siembra en campo. Según Landis et al. (1989) el proceso productivo comprende varias etapas interrelacionadas que deben ser cuidadosamente controladas. En este sentido, un vivero bien gestionado permite asegurar plantas de buena calidad, seleccionar plántulas más sanas y fuertes, disminuir la mortalidad frente a factores ambientales y reducir los costos de producción (Piñuela et al., 2013).

En primer lugar, la preparación del sustrato es crucial para proporcionar un medio óptimo de crecimiento, con una mezcla adecuada que permita drenaje, retención de humedad y esté libre de agentes patógenos mediante procesos de esterilización (Landis et al., 1990). Se entiende por sustrato a cualquier material utilizado como sustituto del suelo para el cultivo de plantas en tubetes. Estos tubetes son recipientes de diversos tamaños y formas que alojan el sustrato y cuentan con un orificio en su base que permite el drenaje del exceso de agua. El volumen del tubete es un factor determinante, ya que limita el tamaño máximo que la planta podrá alcanzar durante su crecimiento (*Manual de vivero*, s.f.).

La siembra de semillas requiere condiciones óptimas de humedad y temperatura para favorecer una alta tasa de germinación. Durante esta fase, se monitorean cuidadosamente las condiciones ambientales para minimizar el estrés en las plántulas emergentes y prevenir enfermedades (Landis et al., 1999). La elección del método de siembra ya sea manual o mecánico, dependerá del tamaño del vivero y de la cantidad de semillas a sembrar (Dumroese et al., 2012). Posteriormente, las plántulas atraviesan la fase de crecimiento y desarrollo, donde el manejo del riego, la nutrición y la ventilación es indispensable para fomentar un crecimiento vigoroso y homogéneo, además del control de plagas y enfermedades (Landis et al., 1989; Landis et al., 1990).

El manejo sanitario constituye un componente esencial en la producción de plántulas en vivero, dado que las enfermedades pueden desarrollarse rápidamente en cultivos en tubetes, donde las condiciones ambientales favorecen la propagación de patógenos. Por ello, es fundamental implementar medidas preventivas que incluyan la

desinfección de los mismos y del sustrato, monitoreo constante de síntomas y la eliminación oportuna de plantas afectadas. Del mismo modo, el control de malezas debe realizarse de manera continua, extrayéndose tempranamente para evitar la competencia por agua, luz y nutrientes (Dumroese et al., 2012).

Haase y Davis (2017) destacan que la eficacia del manejo en cada una de las fases productivas depende en gran medida de la formación y experiencia del personal de vivero. El conocimiento sobre fisiología, morfología, fenología, genética y ecotipo de las especies permite seleccionar y aplicar adecuadamente las técnicas culturales más apropiadas, asegurando la producción de plántulas sanas, vigorosas y adaptadas a las condiciones del sitio de plantación.

Antes de la transferencia al campo, las plantas son sometidas a un proceso de rustificación, adaptable gradualmente a condiciones ambientales más exigentes, aumentando así su resistencia (Landis et al., 2010). Esta fase, constituye la etapa final de la producción en vivero y tiene como finalidad acondicionar a las plántulas para enfrentar condiciones adversas propias del sitio de plantación, tales como sequías, cambios bruscos de temperatura o vientos fuertes (Del Castillo & Gil, 2012; Dumroese et al., 2012; *Manual de vivero*, s.f.).

La fase de rustificación, generalmente aplicada a los 30 días aproximadamente antes de la plantación, orienta el crecimiento hacia el sistema radicular y la acumulación de reservas, lo que permite a las plántulas resistir el levantado, transporte y establecimiento en campo, asegurando mayor supervivencia y desempeño inicial (Dumroese et al., 2012). No obstante, se advierte que una rustificación acelerada o incompleta puede producir plántulas con características morfológicas aparentemente correctas, pero con condiciones fisiológicas inadecuadas, lo que se traduce en una menor supervivencia en campo (Dumroese et al., 2012).

Al final del proceso de producción de los plantines se realiza una clasificación y evaluación de calidad de las plántulas (considerando atributos como altura, diámetro y sistema radicular) para seleccionar las unidades más aptas para la plantación (Landis et al., 2010). La selección de plántulas de primera calidad asegura un óptimo arraigamiento y vigor vegetativo suficiente para resistir adversidades climáticas y plagas, al tiempo que reduce costos de transporte y de mano de obra (Del Castillo & Gil, 2012).

Este conjunto de etapas y cuidados asegura que las plántulas producidas cumplan con los requerimientos morfológicos y fisiológicos necesarios para optimizar la sobrevivencia y el rendimiento productivo en el sitio de plantación (Landis et al., 2010).

2.5 UTILIZACIÓN DE TUBETES Y SU EFECTO

En el contexto de viveros que producen plantas en tubetes, el diseño del tubete y la composición del medio de cultivo influyen significativamente en el desarrollo y la calidad de las plantas (Landis et al., 2014). El tipo de tubete tiene un efecto directo sobre la forma inicial del sistema radicular, debido a la plasticidad del desarrollo de las raíces (Haase et al., 2021; Kinghorn, 1978; Nelson, 1996; Sutton, 1969, 1980). Las bandejas pueden variar en volumen, dimensiones, forma, profundidad y disposición de los orificios

de drenaje, así como en la presencia o ausencia de ranuras o nervaduras, y estas características afectan la densidad de plantación, la frecuencia y cantidad de riego requerido, y en consecuencia el crecimiento y vigor de las plantas (Landis et al., 2014). Además, variables como el volumen en relación con la densidad de crecimiento determinan el desarrollo radicular óptimo y un adecuado llenado del cepellón o tapón del sustrato (Landis et al., 1990). Por esta razón, las estrategias de manejo en vivero deben orientarse a generar tubetes adaptados a las condiciones del sitio de destino, lo que implica considerar factores como el tamaño y profundidad de la cavidad, la densidad de siembra, la edad del plantín y la época de trasplante (Grossnickle & Ivetić, 2022).

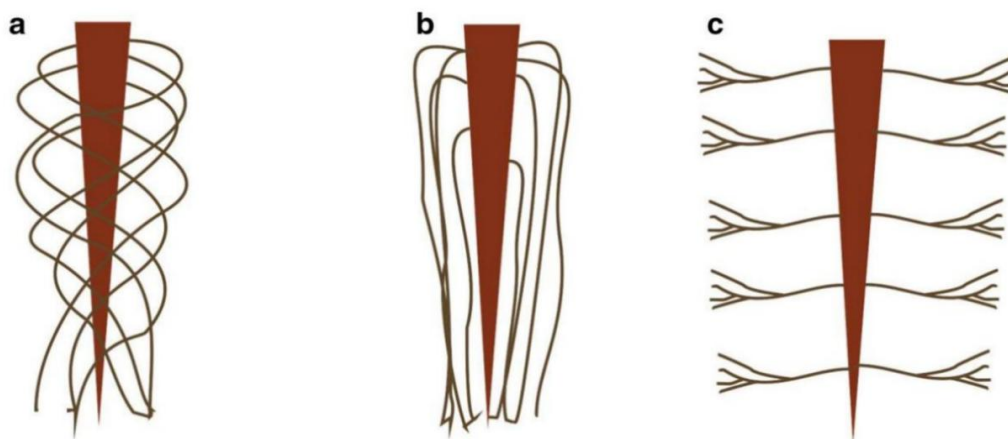
En este sentido, los tubetes modernos están diseñados específicamente para favorecer una arquitectura radicular funcional y de calidad. Incorporan paredes rígidas con ranuras o nervaduras verticales internas, crestas y orificios dispuestos de manera estratégica para guiar el crecimiento de las raíces hacia abajo, evitando la formación de espirales. Esto favorece una mayor fibrosidad y un sistema radicular bien estructurado, que mejora el anclaje y la absorción de recursos una vez trasplantado el plantín. Además, la presencia de orificios en la base facilita un drenaje adecuado, lo cual es fundamental para evitar encharcamientos y enfermedades asociadas (Haase et al., 2021). A su vez, su diseño mejora la eficiencia en la operación del vivero, reduce la manipulación dañina, y contribuye a una mayor calidad y rendimiento de las plántulas durante el trasplante (Haase et al., 2021).

La selección del tipo de tubete adecuado para cada especie forestal debe basarse en múltiples factores, como la morfología del sistema radicular, la tasa de crecimiento de la plántula, la duración de la temporada de cultivo, el tamaño de la semilla, los criterios de calidad definidos para el stock objetivo y las condiciones del sitio de plantación. Por ejemplo, especies que desarrollan raíces pivotantes largas tienden a tener un mejor desempeño en contenedores altos, mientras que aquellas con raíces fibrosas y poco profundas responden mejor en contenedores bajos; por su parte, las especies con raíces carnosas y gruesas se adaptan mejor a contenedores más anchos (Landis et al., 2014).

Además del tamaño, forma y disposición de los tubetes, el diseño interno de las cavidades tiene una influencia directa sobre la arquitectura del sistema radicular de las plántulas. Se han identificado tres categorías generales de sistemas radiculares en función del tipo de tubete utilizado (Nelson, 1996). La categoría A corresponde a cavidades cilíndricas de paredes lisas, donde suele formarse un patrón de raíces en espiral. La categoría B se genera en cavidades con nervaduras, surcos o crestas verticales, que guían las raíces hacia abajo a lo largo de las paredes del contenedor, promoviendo una poda aérea en la base y evitando el enrollamiento. Por su parte, la categoría C se asocia a cavidades con paredes tratadas químicamente (por ejemplo, con cobre), o a diseños con malla o ranuras que permiten una mayor aireación, lo que da lugar a un sistema radicular más horizontal, fibroso y con distribución uniforme (Grossnickle & Ivetić, 2022). Además, esta categoría también incluye los tubetes diseñados con papel.

Figura 3

Patrón de desarrollo radicular según el tipo de diseño del tubete



Nota. Tomado de Grossnickle e Ivetić (2022).

Diversos estudios han demostrado que los tubetes acanalados tratados con cobre, en comparación con los acanalados sin tratamiento, pueden inducir sistemas radiculares de estructura más horizontal y con un mayor número de raíces laterales cortas, sin afectar la masa radicular total. Además, este tipo de tubetes reduce significativamente deformidades como la raíz pivotante en forma de L o las raíces en espiral (Nelson, 1989; Ortega et al., 2006; Rune, 2003). En este sentido, el uso de cobre como tratamiento ha demostrado aumentar la cantidad de raíces laterales de primer orden en plántulas tanto de coníferas (McDonald et al., 1984; Nelson, 1999) como de especies de madera dura (Mariotti, Maltoni, Chiarabaglio, et al., 2015; Mariotti, Maltoni, Jacobs, et al., 2015; Nelson, 1999; Smith & McCubbin, 1992), redistribuyendo las raíces primarias de manera más uniforme a lo largo del cepellón.

En este contexto, los tubetes que promueven una arquitectura radicular de categoría B tienden a lograr un llenado más rápido del cepellón en comparación con los tratados con cobre que generan formas de categoría C. Esto se debe a que el patrón de raíces verticales a lo largo de las paredes laterales de la cavidad permite una ocupación más temprana del sustrato, incluso cuando las plántulas crecen al mismo ritmo (Fernández et al., 2007). Por tanto, en tubetes tratados con cobre se requiere mayor tiempo de cultivo y un desarrollo más robusto del sistema radicular y del tallo para asegurar la integridad del cepellón al momento del trasplante. No obstante, estos cepellones aún pueden mantenerse más friables que los de las categorías A y B, lo que demanda una manipulación cuidadosa durante la plantación (Grossnickle & Ivetić, 2022).

El uso de tubetes inadecuados es una de las causas más comunes de malformación del sistema radicular de las plántulas en vivero, lo que puede provocar una distribución anormal de las raíces laterales y superficiales. Esto genera un desequilibrio en la absorción de agua y nutrientes, afectando negativamente el desarrollo de la planta tras la plantación (Mafia et al., 2005). Por lo tanto, las prácticas

de cultivo radicular en vivero deben estar orientadas a cumplir los objetivos definidos de calidad radicular, como parte de un conjunto de atributos de la plántula que influyen en un rendimiento exitoso en campo, especialmente en relación con las condiciones cambiantes del sitio de trasplante. Además, resulta clave explorar los beneficios del uso de tubetes con mayor volumen y profundidad de cavidad, con el fin de promover un mayor desarrollo radicular y de sustrato. Esto puede favorecer el crecimiento de las raíces después de la plantación y permitir un acceso más eficiente al agua y los nutrientes en una porción más amplia del perfil del suelo, evitando así condiciones de estrés en el establecimiento (Grossnickle & Ivetić, 2022).

2.6 INDICADORES DE CALIDAD

La obtención de plántulas de calidad con buena capacidad de crecimiento radicular es fundamental para asegurar el éxito del establecimiento en cualquier forma de producción forestal (Grossnickle & Ivetić, 2022). Desde principios del siglo XX, los silvicultores han reconocido la importancia de contar con plántulas que presentan atributos deseables, los cuales se relacionan directamente con su supervivencia y crecimiento tras la plantación. A lo largo del tiempo, la concepción de lo que constituye una “plántula de calidad” ha ido evolucionando, hasta convertirse en un concepto relevante tanto para el viverista, que debe producir material de alta calidad, como para el silvicultor, que depende de esas características para lograr el éxito de sus programas de plantación. En este marco, se han desarrollado y aplicado diversos procedimientos de evaluación que permiten medir múltiples atributos morfológicos y fisiológicos de las plantas (Grossnickle & MacDonald, 2018).

En este sentido, el sistema radicular debe ocupar un lugar central en el estudio de los parámetros morfológicos, ya que garantiza un mejor rendimiento en campo. Las raíces están directamente relacionadas con las actividades fisiológicas de las plántulas en el complejo suelo-agua-ambiente vegetal (Carneiro, 1995), coincidiendo con lo señalado por Hermann (1964), quien destacó que el peso de la materia seca de las raíces es uno de los parámetros más importantes para la supervivencia y el establecimiento en campo. En estudios realizados con *Pseudotsuga menziesii*, Hermann (1964) observó que la supervivencia fue considerablemente mayor cuanto más desarrollado era el sistema radicular, independientemente de la altura de la parte aérea.

Para evaluar esta calidad, se utilizan diversas variables morfológicas, tales como la altura, la configuración de las raíces, el diámetro del cuello del tallo, la relación entre brote y raíz, la relación entre el diámetro del tallo y la altura, el peso de materia seca del brote y la raíz, la rigidez del brote, y aspectos nutricionales. Entre ellas, la correlación entre la altura de la plántula y el peso de materia seca del brote se destaca por su buena contribución relativa al patrón de calidad de la plántula (Gomes et al., 2002).

Un mayor diámetro del tallo y un mayor tamaño del sistema radicular confieren una mayor probabilidad de supervivencia y crecimiento, ya que reducen la susceptibilidad al estrés post-plantación al mejorar la absorción y el transporte de agua hacia el follaje (Grossnickle, 2005). En este sentido, South (1987) encontró que el diámetro del cuello continúa siendo el atributo que mejor predice el potencial de crecimiento en campo. Por otro lado, una mayor altura proporciona una ventaja

competitiva, principalmente en términos de acceso a la luz, en sitios con presencia de vegetación competidora. Sin embargo, cuando las condiciones ambientales del sitio son limitantes (por ejemplo, suelos secos o alta demanda evaporativa), las plántulas con sistemas aéreos más pequeños o con una menor relación brote/raíz presentan una mejor adaptación (Mexal & Landis, 1990; Thompson, 1985).

La relación entre la biomasa de la parte aérea y la del sistema radical representa el balance entre el área de transpiración y el área de absorción de agua, y se determina a partir de los pesos secos de ambas fracciones. En este sentido, una planta de calidad debe presentar un coeficiente de relación lo más bajo posible, de manera de asegurar una adecuada disponibilidad hídrica y favorecer su supervivencia en campo (Rodríguez, 2008).

Fonseca et al. (2002) advierten que estas variables no deben analizarse de forma aislada, ya que ello podría conducir a errores de selección, como favorecer plántulas altas pero frágiles, descartando aquellas más pequeñas pero vigorosas. En este contexto, proponen el uso del índice de calidad de Dickson (IQD), desarrollado originalmente por Dickson et al. (1960), como una medida morfológica integrada y prometedora, que permite evaluar simultáneamente aspectos de robustez y equilibrio en la distribución de la fitomasa. Esta herramienta se destaca por su aplicabilidad práctica y rápida, además de su utilidad en la toma de decisiones silvícolas orientadas a mejorar la calidad de las plántulas (Fonseca et al., 2002). El cálculo se realiza a partir de la materia seca total (TDM), la altura del brote (SH), el diámetro de la base del tallo (SBD), la materia seca del brote (SDM) y la materia seca de la raíz (RDM).

Este índice es considerado un buen indicador de la calidad de las plántulas, ya que integra en su cálculo la robustez de la planta y el equilibrio en la distribución de la biomasa, ponderando diversos parámetros morfológicos relevantes para la evaluación de la calidad (Fonseca et al., 2002). Cuanto mayor sea su valor, mejor será la calidad de la plántula producida (Caldeira et al., 2012).

No obstante, este índice puede verse influenciado por diversos factores, como la especie evaluada, el manejo en vivero, el tipo y proporción del sustrato utilizado, el volumen del contenedor e, incluso, la edad en la que se realiza la evaluación (Gomes et al., 2013). Estos elementos destacan la importancia de un enfoque integral y contextualizado en la evaluación de la calidad de plántulas para asegurar el éxito en los procesos de producción y establecimiento.

Además de los índices integrados que consideran la distribución de la biomasa, se utilizan indicadores morfológicos no destructivos que permiten evaluar la estabilidad estructural de las plántulas. Entre ellos, el índice de robustez (HD) se define como la relación entre la altura del brote y el diámetro del cuello del tallo, constituyendo una herramienta eficaz para analizar el equilibrio entre el crecimiento en altura y el engrosamiento del tallo. Valores bajos de este índice se asocian con plántulas más robustas, de mejor calidad y mayor estabilidad estructural, mientras que valores elevados indican plantas más esbeltas y menos resistentes, como consecuencia de una desproporción entre la altura y el diámetro del tallo (Schwartz et al., 2022).

Asimismo, este índice ha sido señalado como un buen indicador de la capacidad de las plántulas para tolerar condiciones adversas, como la desecación causada por el viento, así como de su supervivencia y potencial de crecimiento, especialmente en sitios con limitaciones hídricas (Reyes et al., 2014).

Complementariamente, el índice de proporcionalidad biométrica (IPB), definido como la relación entre la biomasa seca aérea y la biomasa seca de raíz, equivalente a la relación biomasa aérea/biomasa radicular (AR), se utiliza para reflejar el desarrollo de la planta en vivero (Villalón-Mendoza, 2016). Por lo tanto, una buena calidad de planta se obtiene cuando la parte aérea está proporcionada en sus dimensiones con la biomasa radicular, ya que esto garantiza una mayor supervivencia al evitar que la evapotranspiración exceda la capacidad de absorción de agua por las raíces, considerándose un valor óptimo de 2 para esta relación (May, 1984).

Si bien la obtención de pesos secos implica la destrucción de muestras, estos valores constituyen indicadores altamente representativos del estado y desarrollo del cultivo. En línea con esto, la relación tallo:raíz (T:R) se utiliza como criterio para ajustar la producción en vivero a las condiciones específicas del sitio de plantación, ya que un equilibrio adecuado entre ambas fracciones favorece la supervivencia y el establecimiento en campo (Landis et al., 2010).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La caracterización del área de estudio comprende la descripción del sitio experimental y de las condiciones climáticas predominantes, aspectos fundamentales para interpretar los resultados obtenidos en el vivero.

El experimento se llevó a cabo en el vivero Saucedo (figura 4), ubicado en el kilómetro 80 de la ruta 8, en la localidad de Solís de Matajojo, departamento de Lavalleja.

Figura 4
Vivero Saucedo, sobre ruta 8



Nota. Elaborado con base en QGIS Desktop (versión 3.34.4).

Uruguay está ubicado entre los 30°10' y los 34°58' de latitud Sur y entre los 53°11' y los 58° 26' de longitud Oeste. El clima es templado semi- húmedo con una temperatura media anual de 17°C (Antón Piquero & Sans, s.f.), con una variación que va desde 19,8 °C en el noroeste hasta 16,6 °C en la zona costera sur. Las temperaturas medias más elevadas se registran durante los meses de enero y febrero, mientras que las más bajas ocurren en junio y julio, dependiendo de la región. A nivel nacional, las temperaturas extremas anuales presentan una máxima media de 22,6 °C y una mínima media de 12,9 °C (Castaño et al., 2011).

En el departamento de Lavalleja, las temperaturas medias más altas se registran entre los meses de diciembre y febrero, con valores aproximados de 25 a 28 °C,

mientras que las más bajas ocurren entre junio y agosto, con promedios de 5 a 8 °C (Castaño et al., 2011).

El promedio anual de precipitaciones en Uruguay es cercano a 1100 mm (Antón Piquero & Sans, s.f.); los valores medios anuales acumulados varían entre 1200 y 1600 mm, registrándose los menores totales en el suroeste y los mayores en el noreste, lo que evidencia un gradiente creciente de suroeste a noreste. El departamento de Lavalleja, presenta una precipitación acumulada aproximada de 80 mm en enero y de 100 mm en julio (Castaño et al., 2011).

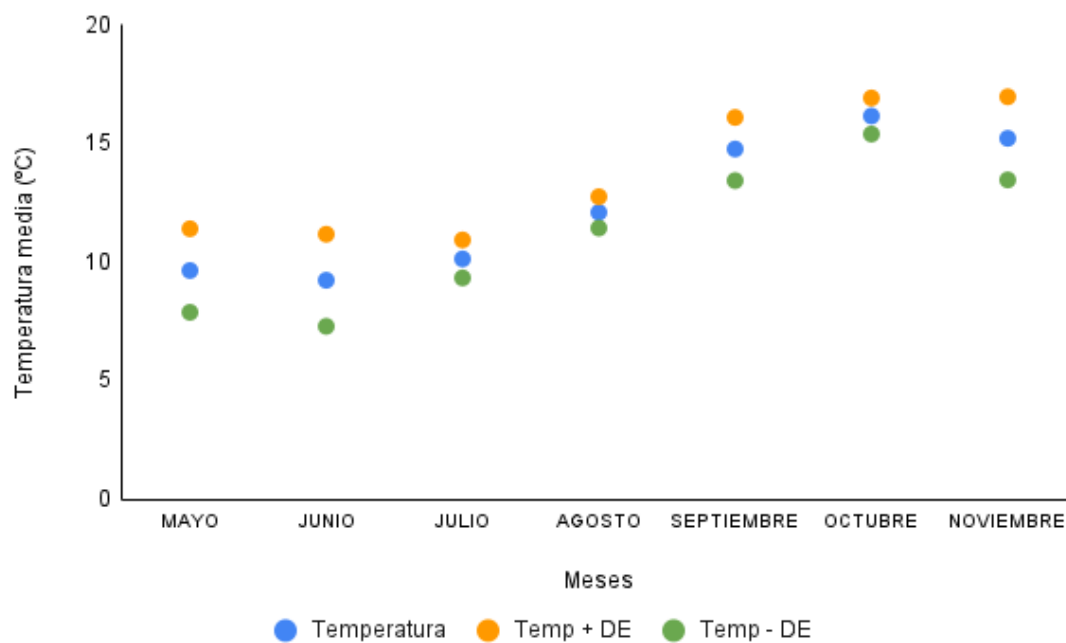
Las heladas se registran con mayor frecuencia en julio, de 7 a 11 días según la zona, seguidas por junio, agosto, mayo y septiembre, mientras que en octubre su ocurrencia es mínima, con menos de un día promedio en la mayoría del país (Castaño et al., 2011).

En este contexto climático, los datos de temperatura media y precipitación efectiva utilizados en este trabajo fueron obtenidos de la base de datos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), seleccionando la estación agroclimática "INIA Treinta y Tres - Paso de la Laguna", en el período se marcó 29-05-2025 a 18-11-2025 y las variables seleccionadas fueron temperatura media y precipitación y evatranspiración correspondientes a la estación meteorológica más cercana al sitio experimental (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.).

A continuación, la figura 5 presenta la evolución de las temperaturas medias registradas durante el período del ensayo en vivero, así como también su desvío estándar. Durante el período evaluado, las temperaturas medias presentaron valores acordes a la época del año. Los meses de invierno mostraron valores más bajos, mientras que a partir de agosto se evidenció un incremento gradual de la temperatura, alcanzando valores máximos en octubre, considerando el período experimental. Este comportamiento térmico es representativo de las condiciones ambientales bajo las cuales se desarrolló el ensayo.

Figura 5

Variación mensual de la temperatura media registrada durante el período del experimento

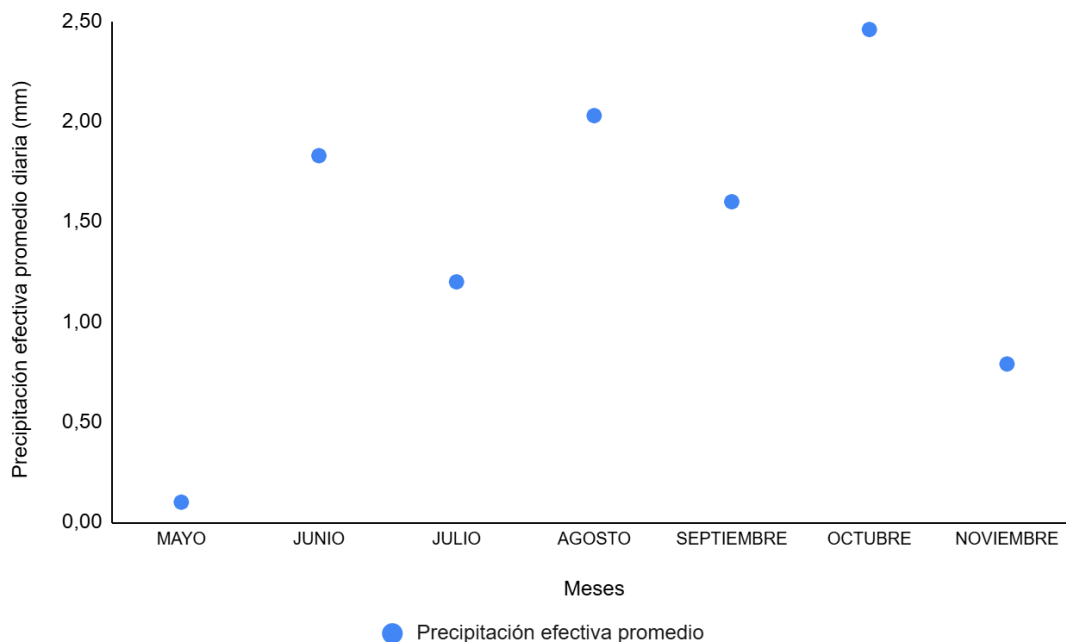


Nota. DE: desvío estándar (\pm DE respecto a la temperatura media).

Por su parte, la figura 6 muestra la precipitación efectiva promedio mensual registrada durante el mismo período. Se observaron valores bajos de precipitación efectiva, con un máximo en octubre y ausencia de aportes significativos en el periodo del ensayo en mayo, mes en el que el registro climático comprendió únicamente los últimos tres días del mismo.

Figura 6

Precipitación efectiva promedio mensual durante el período del experimento



3.2 MATERIAL VEGETAL UTILIZADO Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Se emplearon plantines de *E.smithii* de origen seminal, procedentes de Sudáfrica y provistos por la compañía Sappi. La siembra se realizó el 29 de mayo de 2025. El ensayo se desarrolló bajo un diseño factorial completamente al azar, conformado por dos tratamientos: tipo de tubete, con tres niveles (cuadrado, chico y grande), y tratamiento hormonal, con dos niveles (con y sin aplicación), resultando en seis combinaciones de tratamientos.

Se emplearon tres tipos de tubetes, diferenciados en función de su geometría y volumen. El primero correspondió a un tubete de sección cuadrada, identificado en el presente estudio como tubete 1 (T1) con un volumen de 172,40 cm³; el segundo consistió en un tubete de menor tamaño y sección circular con 30,49 cm³, denominado tubete 2 (T2); y por último el tercero correspondió a un tubete de mayor tamaño, también de sección circular, identificado como tubete 3 (T3), el cual presentó un volumen de 325,125 cm³.

El tratamiento hormonal se aplicó vía foliar en una única ocasión, el 4 de septiembre de 2025, cuando las plantas tenían 99 días luego de la siembra, asumiendo una germinación a los 14 días aproximadamente. Se utilizó una solución compuesta por ácido naftalenacético (ANA) y aminoetoxivinilglicina (AVG), en concentraciones de 600 mg L⁻¹ y 125 mg L⁻¹, respectivamente. Las aplicaciones fueron realizadas hasta punto de goteo, con un volumen aproximado de 15 mL plantín⁻¹, conforme a Bolaño Méndez et al. (2023). Para cada uno de los tres tipos de tubetes evaluados, las plantas se

dividieron en dos grupos: uno que recibió la aplicación hormonal (A) y otro que permaneció sin tratamiento (SA) y se utilizó como testigo. A su vez, para cada combinación de tipo de tubete y aplicación hormonal, las plantas se distribuyeron en tres parcelas por tratamiento.

De forma complementaria, y con el fin de establecer el estado inicial de los plantines al momento de la aplicación, a los 99 días post siembra, se realizó una caracterización morfológica de las plantas con el objetivo de describir su estado inicial en función del tipo de tubete. Para cada tratamiento (T1, T2 y T3), se establecieron tres parcelas, en cada una de las cuales se evaluaron 15 plantas seleccionadas al azar. En cada parcela se midió DC, H y se determinó el peso fresco y seco de hojas, tallos y raíces (Anexo B). Para las distintas mediciones se emplearon una balanza de precisión, un calibre, una regla y una estufa. Con el fin de obtener mediciones de raíces lo más precisas posible, se utilizaron baldes con agua para facilitar la limpieza y la remoción de la mayor parte del sustrato adherido.

Figura 7

Plantines luego de la aplicación hormonal



Figura 8

Registro del PSH como parte de la evaluación morfológica de los plantines

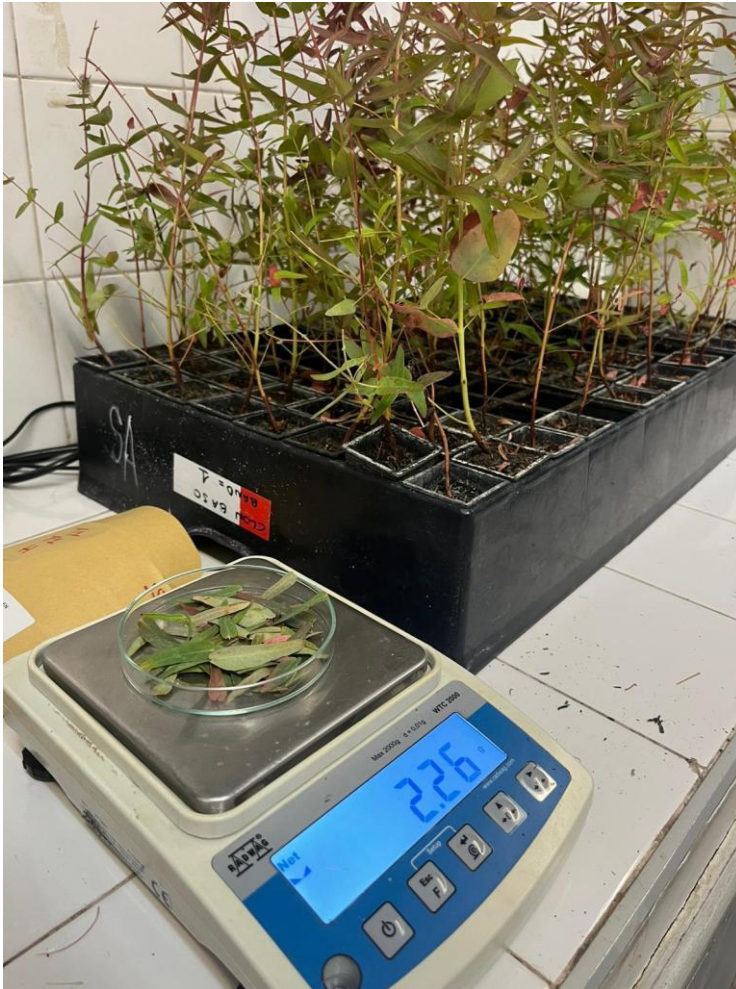


Figura 9

Muestras de raíces del T1, antes del proceso de lavado y eliminación del sustrato



3.3 EVALUACIÓN DE PLANTINES Y ANÁLISIS DE DATOS

Como primera evaluación, realizada a los 99 días posteriores a la siembra (04/09/2025), se registraron, tal como se describió en el apartado anterior, los siguientes indicadores morfológicos y de biomasa: DC, H, PSH, PST, PSR y PSTT (Tabla A1).

La segunda y última evaluación se efectuó a los 75 días posteriores a la aplicación del tratamiento hormonal y a los 173 días posteriores a la siembra (18/11/2025), registrándose los mismos indicadores mencionados anteriormente. A partir de las variables medidas se calcularon distintos índices de calidad de planta, los cuales permiten evaluar el equilibrio morfológico, la asignación de biomasa y el potencial de supervivencia en campo. Para esta evaluación final se analizaron todas las plantas viables, estableciéndose tres parcelas por combinación de tratamiento; el número de individuos por parcela varió según el tipo de tubete y la aplicación hormonal, oscilando entre 16 y 23 plantines por parcela (Tabla A2).

3.3.1 Indicadores utilizados para evaluar la calidad de los plantines:

- Relación altura - diámetro (H/D):

$$H/D = \frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} \quad (1)$$

- Relación biomasa aérea - biomasa radicular:

$$A/R = \frac{\text{Biomasa aérea (g)}}{\text{Biomasa radicular (g)}} \quad (2)$$

- Relación peso seco de hojas - peso seco radicular:

$$PSH/PSR = \frac{\text{Peso seco de hojas (g)}}{\text{Peso seco radicular (g)}} \quad (3)$$

- Índice de Calidad de Dickson:

$$ICD = \frac{\text{Biomasa total (mg)}}{\frac{\text{Altura (cm)}}{\text{Diámetro (mm)}} + \frac{\text{Biomasa aérea (mg)}}{\text{Biomasa radicular (mg)}}} \quad (4)$$

3.3.2 Análisis estadístico

El análisis estadístico del experimento se realizó mediante un modelo lineal general. Para cada variable evaluada se ajustó un modelo considerando como factores fijos el tipo de tubete y la aplicación hormonal, así como la interacción entre ambos factores.

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + H_j + TH_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} : variable respuesta
- μ : media general
- T_i : efecto del tubete ($i = 1, 2, 3$)

- H_j : efecto del tratamiento hormonal ($j = SA, A$)
- $(T \times H)_{ij}$: interacción entre tubete y hormona
- ϵ_{ijk} : error experimental

Previo al análisis de varianza (ANOVA), se verificaron los supuestos de normalidad, homogeneidad de varianzas e independencia de los residuos, validándose los modelos y análisis realizados; los resultados de estas evaluaciones se presentan en la tabla A3. En aquellos casos en los que no se dispuso de estadísticos inferenciales específicos, la validación de los supuestos se efectuó mediante el análisis gráfico de los residuos (Tabla A3). Cuando se detectaron efectos significativos, se realizó la comparación de medias utilizando el método de mínimos cuadrados ajustados (estimated marginal means, *emmeans*), aplicando la corrección de Sidak para el control del error tipo I.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN MORFOLÓGICA DE LOS PLANTINES

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la evaluación morfológica de los plantines a los 99 (tabla 1) y 173 (tabla 2) días post siembra. Al comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con los reportados por Bolaño Méndez et al. (2023), se observan diferencias en el comportamiento morfológico de los plantines.

En dicho trabajo, los plantines evaluados a los 79 días después de la siembra presentaron un diámetro al cuello (DC) promedio de 1,35 mm, con valores máximos y mínimos de 1,61 mm y 1,08 mm, respectivamente, lo que indica un mayor desarrollo de diámetro en comparación con los plantines evaluados en este estudio. En este caso, los valores máximos de diámetro registrados para los tres tipos de tubete fueron de 0,70 mm, 0,79 mm y 0,90 mm, los cuales no alcanzaron los valores mínimos reportados por Bolaño Méndez et al. (2023).

En contraste, al analizar la altura de las plantas, los resultados obtenidos superaron los valores promedios reportados en el estudio de referencia, donde se registró una altura media de 12,97 cm, con un máximo de 14,70 cm y un mínimo de 11,80 cm. En el presente estudio, los plantines producidos en los tres tipos de tubete alcanzaron alturas superiores, con valores promedio de 18,60 cm, 22,10 cm y 22,40 cm, respectivamente, presentes en la tabla 1.

En relación con las medidas de PSR, los tres tipos de tubetes evaluados en este estudio presentaron valores superiores al promedio reportado por Bolaño Méndez et al. (2023), el cual fue de 0,098 g. En dicho trabajo, los valores variaron entre un mínimo de 0,046 mm y un máximo de 0,143 g. En contraste, en el presente estudio se registraron valores máximos de 0,48, 0,91 y 1,31 g para cada tipo de tubete, mientras que los valores mínimos fueron de 0,08, 0,10 y 0,06 g, respectivamente. Estos resultados indican una mayor amplitud de variación y, en general, valores más elevados de PSR respecto a los informados por Bolaño Méndez et al. (2023).

Al comparar las tasas medias diarias de crecimiento obtenidas a los 99 días post siembra con las reportadas por Bolaño Méndez et al. (2023), se observó que el incremento en DC fue inferior, con valores de 0,0054, 0,0048 y 0,0071 mm/día, frente al valor de 0,0171 mm/día informado en dicho trabajo. En cuanto a la H, las tasas medias diarias resultaron similares entre ambos estudios, registrándose valores de 0,1527, 0,1583 y 0,1597 mm/día en el presente trabajo y 0,1642 mm/día en el antecedente considerado. Por el contrario, la tasa media diaria de acumulación de PSR fue superior en este estudio, con valores cercanos a 0,0023, 0,0024 y 0,0024 mm/día, en comparación con el valor de 0,0012 mm/día reportado por los autores mencionados.

Las diferencias observadas entre los valores registrados entre este trabajo y el de Bolaño Méndez et al. (2023) podrían estar asociadas, entre otros factores, a la fecha de siembra de los plantines. En el estudio citado, la siembra se realizó el 08/03/2021, mientras que en este ensayo tuvo lugar el 29/05/2025, lo que implica que el crecimiento

inicial se desarrolló bajo condiciones ambientales distintas, especialmente en términos de temperatura y radiación. Estas variaciones estacionales pueden influir en la tasa de crecimiento y en la asignación de biomasa, contribuyendo a las diferencias morfológicas registradas. Adicionalmente, otro factor que podría haber incidido en las diferencias registradas es el tipo de tubete utilizado, dado que en la presente tesis se evaluaron tres tipos de tubetes con diferentes volúmenes, mientras que en el estudio de Bolaño Méndez et al. (2023) se empleó un único tipo de tubete de 51,32 cm³ y distinto de cualquiera de los tres utilizados en el presente trabajo. Cabe señalar, sin embargo, que la fuente de semilla fue la misma en ambos estudios, lo que permite descartar el origen genético del material como causa de las diferencias observadas y refuerza la hipótesis de que estas se deben principalmente a factores ambientales y de manejo.

En concordancia con lo anterior, los resultados reportados por Storck et al. (2016), evaluados a los 90 días posteriores a la siembra, muestran una tendencia similar, evidenciando la influencia del tamaño del tubete sobre el desarrollo inicial de los plantines. En dicho estudio, los tubetes de 55, 100 y 200 cm³ alcanzaron H promedio de 12,20; 15,52 y 14,81 cm, respectivamente, mientras que el DC fue de 0,19; 0,12 y 0,13 mm. Asimismo, el PSTT aumentó con el volumen del tubete, registrándose valores de 0,20; 0,34 y 0,37 g, respectivamente.

De manera comparable, en el presente trabajo se observó un comportamiento similar, donde los mayores volúmenes de tubete tendieron a presentar valores superiores de crecimiento y biomasa. El tubete 1, presentó una H de 15,12; el tubete 2 de 15,67 y el tubete 3 de 15,81 cm. Presentaron DC promedio de 0,54; 0,48 y 0,70 mm, respectivamente. En cuanto al PSTT, los valores registrados fueron de 0,49; 0,50 y 0,69 g, observándose el mayor valor en el tubete de mayor volumen.

Tabla 1
Evaluación morfológica de los plantines a los 99 días post siembra

Tubete		DC	H	PSH	PST	PSR	PSTT	HD	AR	PSH/PSR	ICD
1	Media	0,48	15,12	0,21	0,05	0,24	0,50	33,23	1.291,51	1.005,48	0,46
	Desvío Estándar	0,12	2,23	0,08	0,02	0,11	0,19	8,10	743,83	591,14	0,25
	Máximo	0,70	18,60	0,38	0,09	0,48	0,91	54,19	3.395,06	2.654,32	0,96
	Mínimo	0,26	10,40	0,07	0,03	0,08	0,22	22,33	655,04	445,74	0,10
2	Media	0,54	15,67	0,19	0,07	0,23	0,49	30,60	1.157,24	822,49	0,47
	Desvío Estándar	0,16	2,98	0,12	0,03	0,08	0,19	7,55	747,95	575,75	0,15
	Máximo	0,79	22,10	0,44	0,12	0,38	0,91	52,14	3.525,25	2.515,15	0,72
	Mínimo	0,28	10,50	0,04	0,03	0,10	0,23	23,40	500,00	291,46	0,13
3	Media	0,70	15,81	0,33	0,14	0,22	0,69	23,07	2.467,18	1.667,75	0,34
	Desvío Estándar	0,14	3,01	0,14	0,04	0,12	0,27	4,55	1.132,88	635,04	0,22
	Máximo	0,90	22,40	0,58	0,25	0,56	1,32	31,91	5.400,00	3.109,09	0,94
	Mínimo	0,47	9,40	0,16	0,09	0,06	0,35	14,42	1.115,83	606,18	0,06

Nota. Diámetro al cuello (DC; mm), Altura (H; cm), Peso seco de hojas (PSH), Peso seco de tallo (PST), Peso seco raíz (PSR) y Peso seco total (PSTT; g).

Considerando los distintos volúmenes de tubete evaluados en ambos estudios, descritos anteriormente, y al comparar los resultados obtenidos en este trabajo con los reportados por Storck et al. (2016), se observa que, si bien los volúmenes de tubete, la fecha de evaluación (180 días frente a 173 días) y la especie evaluada (*E. grandis*) no fueron los mismos, las tendencias de crecimiento resultan comparables.

En cuanto al incremento diario en DC, los valores registrados (SA: 0,014, 0,013 y 0,025; A: 0,013, 0,012 y 0,017) fueron superiores a los informados por Storck et al. (2016) (0,0008, 0,0010 y 0,0015). No obstante, los valores reportados por dichos autores se asemejan relativamente más a los obtenidos en el tratamiento con aplicación hormonal, particularmente en los tubetes de menor volumen.

Respecto al incremento diario en H las tasas medias fueron menores en el presente estudio, con valores de 0,15, 0,13 y 0,23 para el tratamiento sin aplicación hormonal y de 0,11, 0,10 y 0,15 para el tratamiento con aplicación hormonal, frente a los valores de 0,1214, 0,1859 y 0,2692 reportados por Storck et al. (2016). En este caso, los resultados del estudio de referencia muestran una mayor similitud con los valores correspondientes al tratamiento sin aplicación hormonal, especialmente en los tubetes de mayor volumen.

Finalmente, la tasa media diaria de acumulación de PSTT fue superior en el presente trabajo (SA: 0,01, 0,01 y 0,02; A: 0,005, 0,004 y 0,010) en comparación con los valores informados por Storck et al. (2016) (0,0024, 0,0050 y 0,0113). En este caso, los valores del estudio de referencia se aproximan en mayor medida a los obtenidos bajo aplicación hormonal, particularmente en los tubetes de mayor volumen.

Tabla 2*Evaluación morfológica de los plantines a los 173 días post siembra*

Tubete		DC	H	PSH	PST	PSR	PSTT	HD	AR	PSH/PSR	ICD
1 SA	Media	2.49	26.59	0.52	0.39	0.39	1.29	10.93	2457.9	1396.86	0.58
	Desvío Estándar	0.65	1.63	0.12	0.24	0.04	0.74	0.45	1723.5	375.17	0.04
	Máximo	3.91	36.01	1.53	1.32	0.73	3.46	19.17	4094.3	10348.38	1.43
	Mínimo	1.15	1.91	0.03	0.04	0.05	0.17	0.66	344.2	183.12	0.06
1 A	Media	2.34	19.41	0.25	0.21	0.36	0.83	8.42	1337.2	682.00	0.70
	Desvío Estándar	0.41	1.25	0.08	0.09	0.07	0.41	0.59	567.1	101.36	0.13
	Máximo	3.17	30.20	0.95	0.53	0.77	1.94	11.65	3721.2	1118.90	1.87
	Mínimo	1.51	12.00	0.04	0.05	0.07	0.18	4.86	686.5	108.55	0.11
2 SA	Media	2.33	22.09	0.40	0.29	0.27	0.96	9.62	2546.1	1475.96	0.39
	Desvío Estándar	0.55	1.79	0.04	0.15	0.02	0.41	0.68	920.1	88.85	0.03
	Máximo	3.50	32.60	0.99	0.64	0.54	1.92	14.66	5959.6	4690.01	0.82
	Mínimo	1.07	10.50	0.06	0.07	0.06	0.19	5.34	1087.4	415.50	0.07
2 A	Media	2.14	17.91	0.19	0.19	0.32	0.70	8.47	1293.2	618.51	0.62
	Desvío Estándar	0.42	1.67	0.04	0.08	0.05	0.34	0.47	613.6	136.20	0.15
	Máximo	3.20	27.70	0.71	0.35	0.71	1.56	11.46	3807.8	1803.71	1.44
	Mínimo	1.18	7.80	0.02	0.04	0.05	0.17	3.67	466.8	149.94	0.07
3 SA	Media	4.32	39.41	1.71	1.25	1.32	4.28	9.41	2710.9	1623.15	2.10
	Desvío Estándar	1.02	4.66	0.22	0.57	0.04	1.57	0.67	1554.9	219.82	1.48
	Máximo	6.17	52.30	4.41	2.38	2.70	7.90	15.38	7639.5	5472.89	9.02
	Mínimo	2.47	18.50	0.62	0.23	0.36	1.45	5.75	405.0	246.83	0.47
3 A	Media	3.04	25.48	0.51	0.42	0.86	1.80	8.66	1293.9	688.87	2.12
	Desvío Estándar	0.84	1.27	0.04	0.25	0.08	0.98	0.49	967.5	144.10	2.34
	Máximo	4.85	38.5	1.51	0.95	2.50	4.09	14.35	6417.9	3607.29	14.06
	Mínimo	1.20	15.5	0.06	0.04	0.14	0.44	5.42	99.5	53.24	0.20

4.2 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS VARIABLES MORFOLÓGICAS E ÍNDICES DE CALIDAD

En la siguiente tabla se presentan los resultados del análisis de varianza correspondiente a las variables morfológicas, de biomasa y a los indicadores de calidad evaluados, considerando el efecto del tipo de tubete, del tratamiento hormonal y de la interacción entre ambos factores. Para la interpretación de los resultados, se consideraron estadísticamente significativos los efectos con valores de $p < 0,05$, y no significativos aquellos con $p \geq 0,05$.

En particular, el factor tubete presentó un efecto significativo sobre las variables asociadas al crecimiento, tales como la H, el DC, los componentes de biomasa (PSH, PST, PSR y PSTT) y el ICD, lo que pone de manifiesto la influencia del volumen del tubete sobre el desarrollo de los plantines. En cuanto al tratamiento hormonal también

mostró efectos significativos en varias variables morfológicas (DC, H) y de biomasa (PSH, PST, PSR, PSTT), en la relación HD y en indicadores de asignación de biomasa (AR, PSH/PSR). Por su parte, la interacción entre los tratamientos, tubete y hormonas, resultó significativa para variables de crecimiento y biomasa como DC, H, HD, PSH, PST, PSR y PSTT.

Tabla 3

Efectos de los tratamientos sobre las variables morfológicas e índices de calidad

Variable	Efecto tubete	Efecto hormona	Efecto I TxH
Diámetro del cuello (DC)	< 0,0001*	0,0005*	0,0117*
Altura (H)	< 0,0001*	0,0067*	0,0113*
Relación H/DC	0,1234	0,0001*	0,0477*
Peso seco aéreo (PSH)	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*
Peso seco tallo (PST)	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*
Peso seco radicular (PSR)	< 0,0001*	0,0001*	< 0,0001*
Peso seco total (PST)	< 0,0001*	< 0,0001*	< 0,0001*
Relación A/R	0,7569	< 0,0001*	0,6131
Relación PSH/PSR	0,5543	< 0,0001*	0,6464
Índice de Dickson (ICD)	< 0,0001*	0,3341	0,7857

Nota. Valores en negrita y con (*) indican efectos significativos ($p < 0,05$).

A continuación, se presentan los resultados de las comparaciones de medias realizadas para aquellas variables en las que se detectaron efectos significativos según el análisis de varianza mostrado en la tabla anterior. Este análisis permitió una evaluación más integral de la calidad de los plantines, superando criterios basados exclusivamente en el tamaño aparente. Estos indicadores resultan particularmente útiles para interpretar el efecto combinado del tipo de tubete y de los tratamientos hormonales sobre el equilibrio estructural y la asignación de biomasa.

La figura 10 ilustra la respuesta del DC de los plantines frente a la combinación del tamaño del tubete y la aplicación del tratamiento hormonal. El ANOVA indicó un efecto significativo del tamaño del tubete y del tratamiento hormonal, así como de la interacción entre ambos. En términos generales, los mayores valores se registraron en los plantines producidos en tubetes de mayor volumen, lo que evidencia la influencia positiva de una mayor disponibilidad de espacio radicular.

La aplicación del tratamiento hormonal se asoció a diferencias significativas en el DC, sin embargo, la respuesta no fue homogénea entre los distintos tamaños de tubete, tal como lo indica la interacción significativa T×H. En particular, el efecto del tratamiento hormonal fue más marcado en los tubetes de mayor volumen, mientras que en los tubetes de menor tamaño las diferencias entre tratamientos fueron menos pronunciadas.

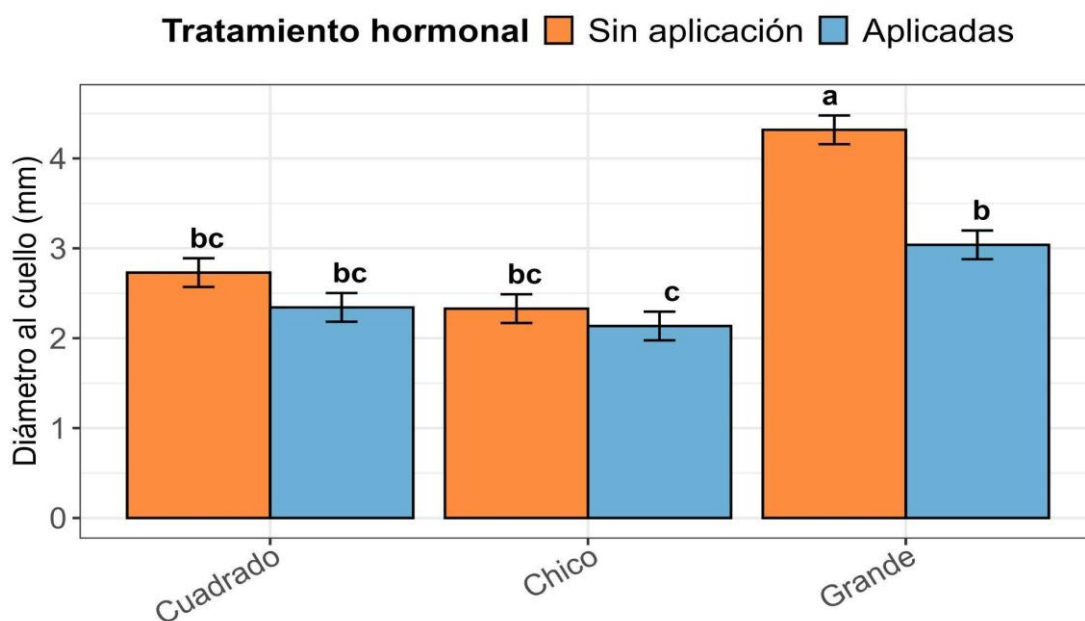
Estos resultados son relevantes desde el punto de vista de la calidad de los plantines, dado que cuanto mayor es el DC, mejor es la calidad morfológica, al

encontrarse este parámetro estrechamente asociado con la supervivencia y el crecimiento inicial en campo (Binotto et al., 2010). En este sentido, los plantines producidos en tubetes de mayor volumen, especialmente aquellos sin aplicación hormonal, presentaron los valores más elevados, lo que sugiere condiciones más favorables para su establecimiento en campo.

Molina et al. (1992) reporta que, en plantines de *Eucalyptus globulus* producidos en tubetes de 94 cm³, a los 180 días post siembra y al momento de expedición, el DC promedio fue de 2,48 mm. Al comparar este valor con los obtenidos en el presente estudio (tabla 2), se observa una marcada similitud con los plantines producidos en los tubetes 1 y 2, tanto SA hormonal como en A, cuyos valores oscilaron entre 2,14 y 2,49 mm. En contraste, los plantines producidos en el tubete 3 alcanzaron DC superiores, con valores de 4,32 mm en el tratamiento SA hormonal y de 3,04 mm en el tratamiento A. Estos resultados indican que volúmenes de tubete similares tienden a generar diámetros comparables, mientras que el incremento en el volumen del tubete se asocia a un mayor crecimiento en DC.

Figura 10

Efecto del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal sobre DC



Para la variable H, el ANOVA mostró un efecto significativo tanto del tamaño del tubete como del tratamiento hormonal, así como de la interacción entre ambos factores. Los plantines cultivados en tubetes de mayor volumen alcanzaron las mayores H, evidenciando el efecto positivo de una mayor disponibilidad de espacio radicular sobre el crecimiento de la parte aérea.

El tratamiento hormonal generó diferencias significativas; sin embargo, la respuesta no fue homogénea entre los distintos tamaños de tubete, tal como lo indica la

interacción significativa T×H (figura 11). En particular, el efecto del tratamiento hormonal fue más marcado en los tubetes de mayor volumen, mientras que en los de menor tamaño la respuesta fue más limitada, lo que sugiere que su efectividad estaría condicionada por el volumen del tubete y la disponibilidad de recursos. Este comportamiento coincide con lo reportado por otros autores, quienes señalan que la respuesta morfológica a tratamientos hormonales puede depender de las condiciones de cultivo, influyendo en la asignación de biomasa entre órganos (Mexal & Landis, 1990; South, 1987).

Diversos autores señalan que las plántulas se encuentran en condiciones adecuadas para la plantación en campo cuando alcanzan H comprendidas entre 20 y 35 cm (Gomes et al., 2002). En el presente estudio, los plantines producidos en el tubete 3 presentaron H medias entre 25 cm (A) y 40 cm (SA), ubicándose mayoritariamente dentro de dicho rango en el primer caso y superándolo en el segundo, lo que podría dificultar la manipulación en campo. En contraste, en el tubete 2 las H medias oscilaron entre 17,91 y 22 cm, registrándose la mayoría de los valores por debajo del rango recomendado, lo que refleja un crecimiento aéreo más limitado.

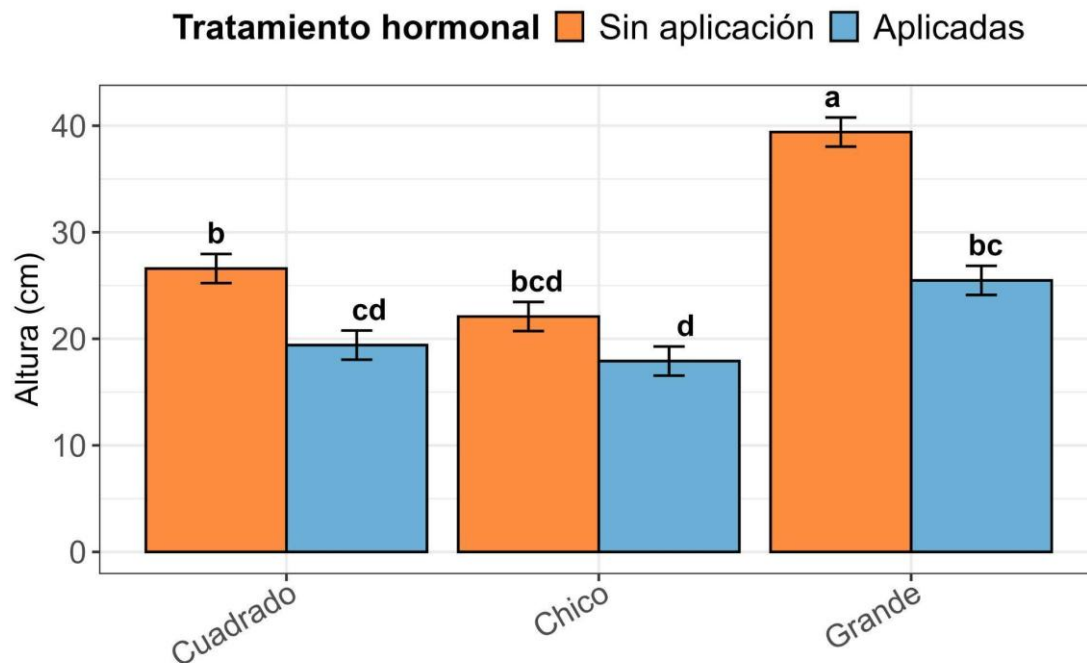
Plantas con alturas superiores a 40 cm que permanecen en tubetes de vivero presentan menores probabilidades de supervivencia en campo, debido a una relación desbalanceada entre la parte aérea y el sistema radical, lo que las vuelve más susceptibles al vuelco por acción del viento y aumenta sus requerimientos hídricos y el tiempo necesario para su establecimiento, en comparación con plantines de menor altura y mayor diámetro (Santiago et al., 2007, como se cita en Morales Pérez, 2018).

Molina et al. (1992) reporta una H promedio de 28,14 cm en plantines. En el presente estudio, los plantines producidos en los tubetes 1 y 2 alcanzaron H promedio inferiores, aun cuando el tubete 1 presentó un volumen mayor. En particular, los valores registrados oscilaron entre 26,59 cm y 19,41 cm para el tubete 1 y entre 22,09 cm y 17,91 cm para el tubete 2, correspondientes a los tratamientos SA y A, respectivamente. Estas diferencias podrían atribuirse, al menos en parte, a variaciones en el manejo nutricional, dado que en el estudio de Molina et al. (1992) se aplicó fertilización de N y P, durante la etapa de vivero, lo que podría haber favorecido un mayor crecimiento aéreo de los plantines, así como a posibles diferencias interespecíficas entre los materiales evaluados.

En los resultados obtenidos para la variable H se mantuvo una tendencia consistente, observándose la producción de plantines con mayores valores de H en los tratamientos sin aplicación de ANA. En el presente trabajo, las medias de H fueron 37 % superiores en el T1 (SA) respecto del T1 (A). De manera similar, en el T2 se registraron valores medios de H 23,35 % mayores en el tratamiento SA en comparación con el correspondiente con el A. Asimismo, en el T3, la ausencia de ANA dio lugar a un incremento del 54,7 % en la H media de los plantines respecto del tratamiento con aplicación. Los resultados coinciden con lo reportado por Bolaño Méndez et al. (2023).

Figura 11

Efecto del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal sobre la altura



Continuando con el análisis de varianza sobre el PSH, PST, PSR y PSTT, evidenció efectos significativos del tamaño del tubete, del tratamiento hormonal y de la interacción T×H, lo que sugiere que la distribución y acumulación de biomasa entre los distintos órganos estuvo condicionada tanto por el volumen del tubete como por la aplicación hormonal, así como por la combinación de ambos factores.

Los resultados obtenidos indican que el tamaño del tubete fue el factor que mayor influencia ejerció sobre el crecimiento morfológico y la acumulación de biomasa de los plantines. En general, los tubetes de mayor volumen promovieron mayores valores de PSH, PST, PSR y PSTT, lo que concuerda con antecedentes que destacan la importancia del espacio radicular y la disponibilidad de recursos en la producción de plantas de calidad. Carneiro (1995) y Santos (2000) obtuvieron resultados similares en masa seca total, trabajando con plántulas de *Pinus taeda* y *Cryptomeria japonica*, respectivamente. Estos autores concluyeron que se obtienen plántulas más grandes en tubetes más grandes, debido al mayor crecimiento del sistema radicular y, en consecuencia, a una mayor ganancia de biomasa seca de los plantines.

El tratamiento hormonal mostró un efecto estadísticamente significativo sobre las variables evaluadas; sin embargo, la respuesta no presentó una tendencia uniforme entre los distintos tamaños de tubetes ni entre los parámetros morfológicos y de biomasa. Las diferencias observadas sugieren que la aplicación hormonal influyó principalmente en la relación entre los atributos de crecimiento, más que en un aumento simultáneo de la H, DC y biomasa total. Este comportamiento se evidenció en la biomasa aérea, donde los efectos del tratamiento variaron según el órgano considerado, sin una respuesta consistente entre el PSH y PST en los distintos tamaños de tubetes.

Tal como se observa en la figura 12, el tubete de mayor volumen fue el único en el que se registraron diferencias significativas en el PSR entre plantas SA y A. En contraste, en los tubetes cuadrado y chico no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos, aunque en este último las plantas con aplicación hormonal presentaron valores levemente superiores de biomasa radicular. Una tendencia similar se observó para las variables PSH, PST y PSTT, donde el efecto del tratamiento hormonal resultó más evidente en el tubete de mayor volumen, mientras que en los tubetes de menor tamaño las diferencias entre tratamientos fueron reducidas o no significativas. Este comportamiento sugiere que la respuesta al tratamiento hormonal estuvo condicionada por el volumen del tubete, manifestándose de manera diferencial según el espacio disponible para el desarrollo del sistema radicular.

Al comparar los valores de PSR obtenidos en el presente estudio con los reportados por Freitas et al. (2013), se evidencian diferencias asociadas principalmente al volumen del tubete. Dichos autores, trabajando con plantines de *Eucalyptus urophylla* en tubetes de 55 cm³ y 180 cm³, registraron valores de PSR de 0,42 y 1,20, respectivamente, a los 120 días posteriores a la siembra, lo que demuestra una relación positiva entre el incremento del volumen del tubete y el aumento del PSR.

En concordancia con estos antecedentes, en el presente estudio el T1 presentó valores de PSR de 0,39 en plantas SA y 0,36 en plantas A, resultados comparables a los obtenidos por Freitas et al. (2013) en tubetes de menor volumen. Por su parte, el T2, de menor capacidad volumétrica, mostró los valores más bajos de PSR (0,27 SA y 0,32 A). En contraste, el T3 registró los valores más elevados de PSR (1,32 SA y 0,86 A), en concordancia con su mayor capacidad, que favorece un mayor desarrollo relativo de la parte aérea.

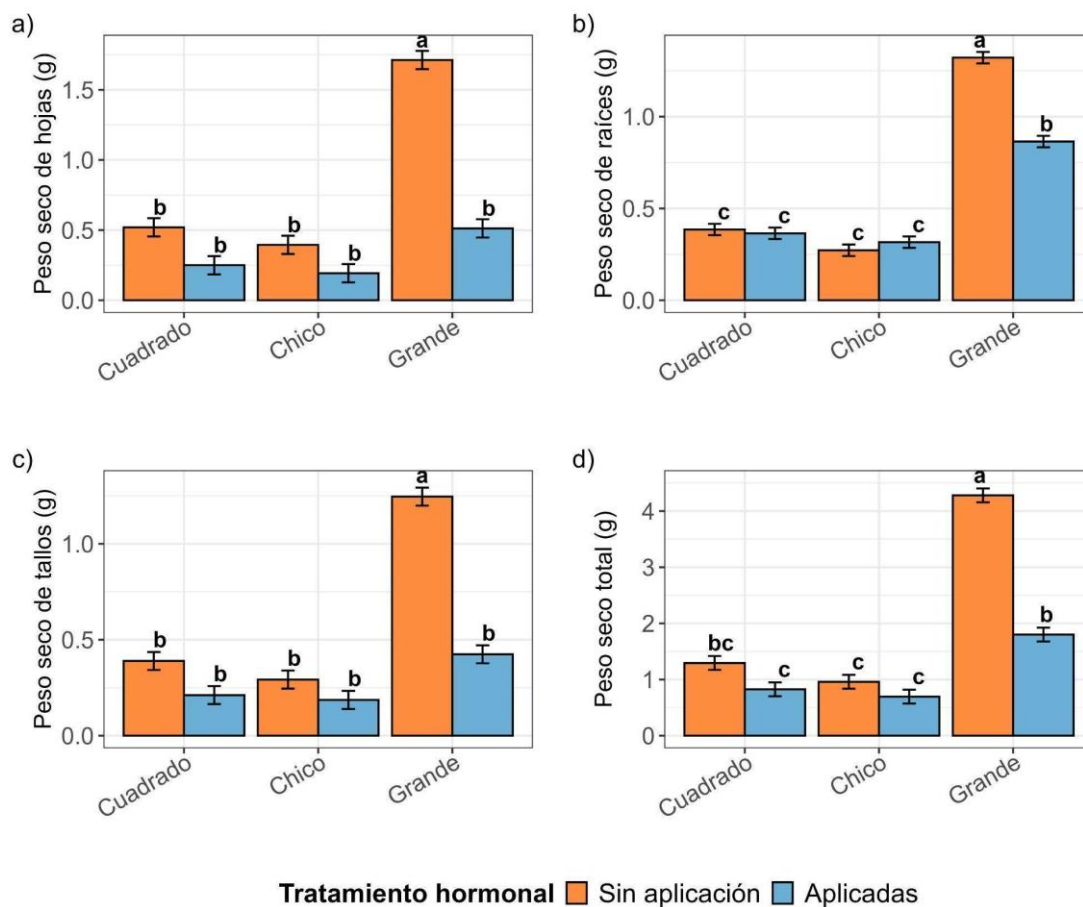
En términos generales, los resultados confirman que tubetes de mayor volumen tienden a promover un mayor desarrollo de la parte aérea en relación con el sistema radical. Asimismo, la aplicación hormonal mostró un efecto variable según el tipo de tubete, sin modificar sustancialmente la tendencia general determinada por el volumen del tubete.

Resultados similares han sido reportados en viveros forestales, donde se señala que la magnitud de la respuesta a reguladores de crecimiento puede verse limitada por las restricciones físicas impuestas al sistema radicular, condicionando la expresión de los tratamientos hormonales en función del volumen del tubete (Landis et al., 2010; Caldeira et al., 2012).

Según Molina et al. (1992), los plantines presentaron un PSTT promedio de 1,57 g. Al comparar este valor con los obtenidos en el presente estudio, se observa que los plantines producidos en los tubetes 1 y 2 alcanzaron valores inferiores, tanto en el tratamiento SA como con A. En particular, el T1 registró valores de 1,29 g y 0,83 g, mientras que el T2 presentó valores de 0,96 g y 0,70 g para los tratamientos SA y con A, respectivamente. En contraste, los plantines producidos en el T3 alcanzaron valores superiores de PSTT en el tratamiento SA (4,28 g), mientras que el tratamiento A presentó un valor inferior (1,80 g).

Figura 12

PSH, PST, PSR, PSTT en función del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal



Con respecto al índice de robustez (HD), el análisis de varianza indicó que el tipo de tubete no presentó un efecto estadísticamente significativo sobre esta variable. En cambio, el tratamiento hormonal mostró un efecto significativo, evidenciando su influencia sobre el HD de los plantines. Asimismo, la interacción T×H resultó estadísticamente significativa, lo que indica que el efecto del tratamiento hormonal sobre el HD varió en función del tamaño del tubete y no fue uniforme entre los distintos tamaños de tubetes.

Los valores más bajos se observaron en los plantines con aplicación hormonal, independientemente del tamaño del envase, mientras que los valores más elevados corresponden al tratamiento sin aplicación en tubete cuadrado. Dado que valores menores de HD se asocian a plantines más compactos y con mayor estabilidad mecánica, las diferencias observadas sugieren que el tratamiento hormonal influyó en la relación entre crecimiento en H y DC, sin que ello implique necesariamente un aumento simultáneo de ambos atributos morfológicos.

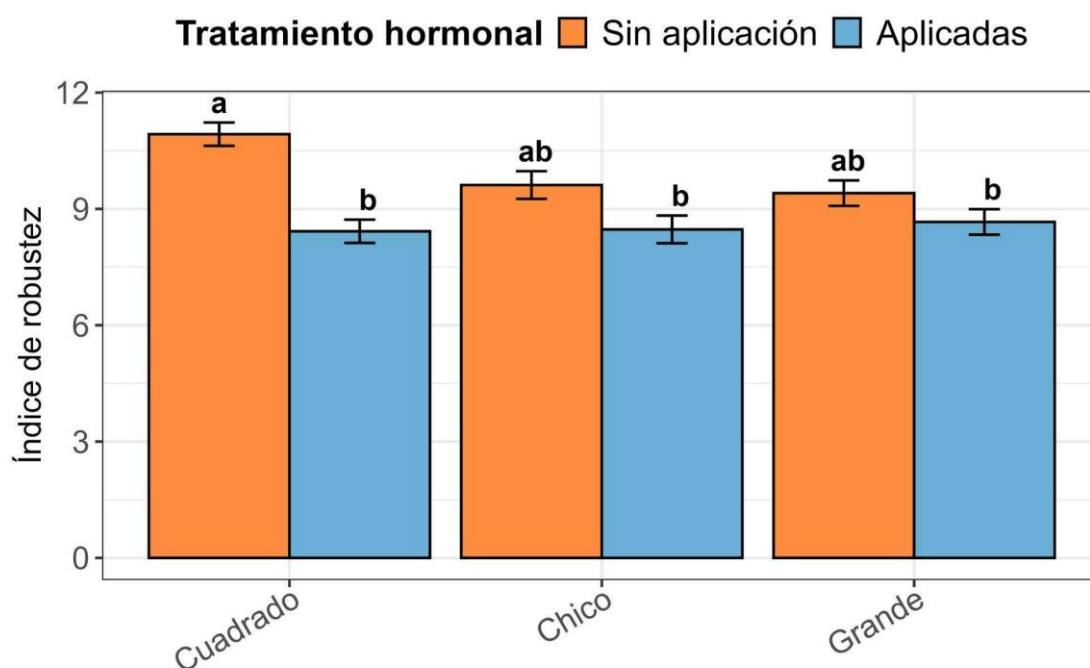
En este sentido, la literatura científica establece rangos óptimos para este índice, indicando que valores comprendidos entre 5 y 10 reflejan una proporción adecuada entre la H y el DC, garantizando una adecuada calidad fitotécnica de las plantas (Quiroz et al., 2009). Por el contrario, valores superiores a 10 evidencian un crecimiento

desproporcionado en H, mientras que valores inferiores a 5 indican tallos excesivamente cortos en relación con el DC (Quiroz et al., 2009). De acuerdo con estos criterios, los tubetes con aplicación hormonal se ubican dentro del rango considerado óptimo, lo que indica un mejor comportamiento de HD, aun cuando visualmente los plantines parecieran de menor tamaño.

En este contexto, aunque los plantines con aplicación hormonal presentaron, desde una evaluación visual, un menor desarrollo en tamaño respecto a otros tratamientos, el análisis de HD permitió una apreciación más precisa de su calidad morfológica. Si bien todos los tratamientos se ubicaron dentro de los rangos considerados aceptables, aquellos con aplicación hormonal exhibieron valores más bajos de este índice, asociados a plantines más equilibrados y estructuralmente estables. Estos resultados ponen de manifiesto que un mayor tamaño no necesariamente se traduce en una mejor calidad de planta, resaltando la importancia de emplear indicadores integrados en la evaluación. En este sentido, las variaciones registradas en el índice de robustez reflejan cambios en la proporción altura/diámetro, dando lugar a plantines relativamente más compactas, aunque con menores valores absolutos de crecimiento.

Figura 13

Índice de robustez, en función del tamaño de tubete y del tratamiento hormonal



En cuanto a la relación entre el PSA/PSR, el análisis de varianza mostró un efecto significativo del tratamiento hormonal, mientras que el tamaño del tubete y la interacción T×H no presentaron efectos significativos sobre esta variable (Ver tabla 3).

La significancia del tratamiento hormonal sobre la relación PSA/PSR indica que la aplicación hormonal afectó principalmente la asignación relativa de biomasa entre la parte aérea y el sistema radical, más que el crecimiento absoluto de las plantas. Este comportamiento coincide con lo señalado por Mexal y Landis (1990), quienes destacan que la calidad del plantín está estrechamente vinculada al equilibrio funcional entre ambos componentes, el cual puede ser modificado por prácticas de manejo en vivero sin que necesariamente se altere el tamaño total de la plántula.

En concordancia con lo anterior, si bien la biomasa aérea total (PSH + PST) fue superior al PSR en todos los tratamientos, las plantas con aplicación hormonal presentaron valores significativamente menores de la relación parte aérea/raíz. Esta respuesta se explica por una reducción proporcionalmente mayor del crecimiento de la biomasa aérea total respecto del sistema radical, evidenciando un cambio en la distribución relativa de la biomasa más que un incremento absoluto del peso seco de raíces. En este sentido, la relación parte aérea/raíz constituye un indicador sensible de la asignación de biomasa, cuya interpretación debe realizarse conjuntamente con los valores absolutos de peso seco, a fin de evitar conclusiones parciales.

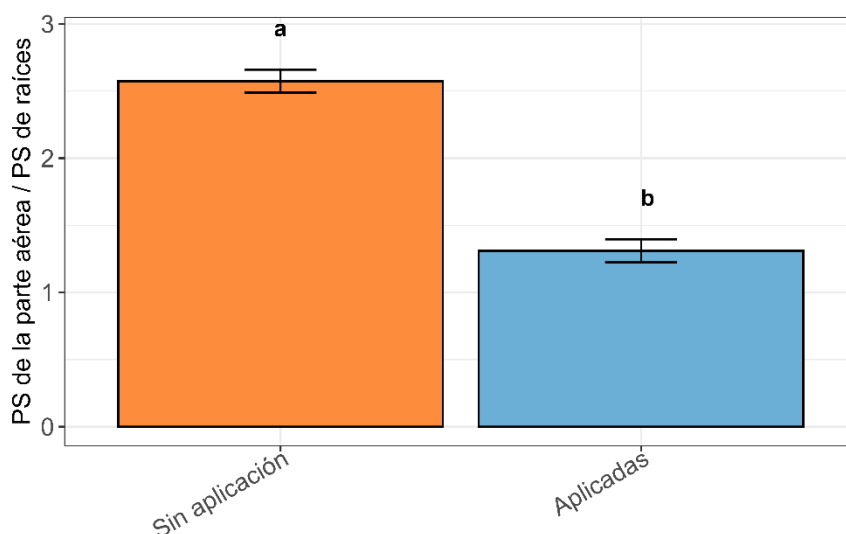
De manera complementaria, los mayores valores de biomasa aérea observados en el tubete de mayor volumen reflejan una mayor inversión en el desarrollo de la parte aérea cuando la disponibilidad de sustrato y recursos no resulta limitante, lo que sugiere que, bajo condiciones favorables, la especie tiende a priorizar el crecimiento aéreo. No obstante, este efecto del tamaño del tubete se vio modulado por el tratamiento hormonal, el cual indujo una disminución de la relación parte aérea/raíz al afectar en mayor proporción el crecimiento de la biomasa aérea total.

Desde el punto de vista de la calidad de planta, una relación parte aérea/raíz baja resulta deseable, ya que permite un mejor balance entre el área de transpiración y la capacidad de absorción de agua, favoreciendo la supervivencia y el establecimiento en campo (Rodríguez, 2008). Complementariamente, la relación A/R es considerada un indicador del equilibrio funcional de la plántula, con valores cercanos a 2 como óptimos para la calidad de planta en especies forestales templadas producidas en el hemisferio norte (May, 1984). No obstante, en especies de rápido crecimiento como *Eucalyptus spp.*, producidas bajo condiciones locales, estos valores suelen ser menores debido a una mayor asignación relativa de biomasa al crecimiento aéreo. En el presente estudio, los plantines con aplicación hormonal presentaron valores significativamente menores de esta relación en comparación con los tratamientos sin aplicación; aun cuando los valores absolutos de crecimiento hayan sido inferiores, ello no implica una menor calidad de planta.

En este contexto, los resultados obtenidos se comparan con los reportados por Bolaño Méndez et al. (2023), quienes registraron valores promedios diarios de A/R de 0,034 en el tratamiento SA y de 0,023 con A. Al contrastar dichos resultados con los obtenidos en esta tesis, se observa una respuesta consistente en términos de asignación relativa de biomasa, aunque con variaciones según el volumen del tubete. En particular, en el tubete 1 los valores promedio diarios de A/R fueron de 0,01 SA y de 0,07 A; en el tubete 2, de 0,014 y 0,007, respectivamente; y en el tubete 3, de 0,015 SA y de 0,007 A.

En conjunto, tanto los resultados de Bolaño Méndez et al. (2023) como los del presente estudio confirman que la aplicación hormonal tiende a reducir la relación parte aérea/raíz, aunque la magnitud de la respuesta se ve modulada por el volumen del tubete. Esta tendencia común refuerza la interpretación de que los reguladores de crecimiento influyen principalmente sobre el equilibrio funcional de los plantines, promoviendo una asignación de biomasa más equilibrada y potencialmente favorable desde el punto de vista de la calidad de planta, más que sobre el crecimiento absoluto de sus componentes.

Figura 14
Relación A / R en función del tratamiento hormonal



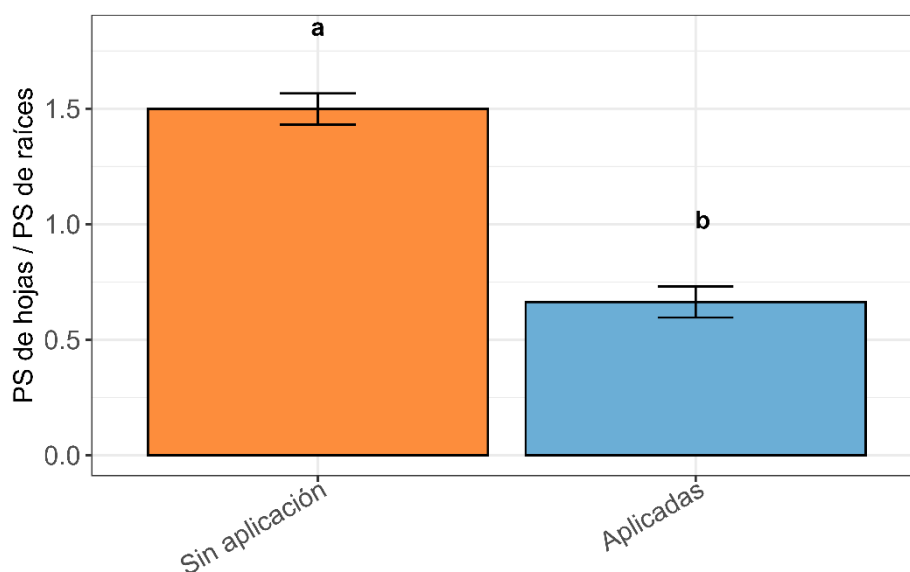
En relación a PSH/PSR, el análisis de varianza mostró un efecto significativo del tratamiento hormonal, mientras que el tamaño del tubete y la interacción T×H no presentaron efectos significativos sobre esta variable.

De manera consistente con el gráfico anterior, las plantas sin aplicación presentaron una mayor relación PSH/PSR, mientras que la aplicación redujo significativamente este valor.

Esto sugiere que la aplicación hormonal modificó la asignación relativa de la biomasa, reduciendo proporcionalmente el desarrollo foliar en relación con el sistema radicular. Una menor relación hojas/raíces puede representar una estrategia conservativa, reduciendo la demanda transpiratoria y mejorando la tolerancia al estrés hídrico inicial tras la plantación. Diversos autores señalan que plántulas con menor proporción de biomasa aérea presentan una mayor tolerancia al estrés hídrico y una mayor probabilidad de establecimiento en campo (Grossnickle, 2005; Landis et al., 2010).

Figura 15

Relación PS de hojas / PS de raíces en función del tratamiento hormonal



En el ICD, el análisis de varianza evidenció un efecto significativo del tamaño del tubete, mientras que el tratamiento hormonal y la interacción T×H no presentaron diferencias estadísticamente significativas.

La significancia del factor tubete indica que el volumen del tubete influyó de manera determinante en la calidad morfológica integral de las plántulas, reflejando diferencias en la robustez y en la distribución de la biomasa. En contraste, la ausencia de efectos significativos del tratamiento hormonal sugiere que la aplicación hormonal no fue suficiente para modificar el valor del índice cuando el crecimiento se considera de forma integrada, incluyendo la altura, el diámetro al cuello y la asignación de biomasa aérea y radicular. Asimismo, la falta de significancia de la interacción T×H indica que la respuesta del ICD estuvo principalmente condicionada por el tamaño del tubete, independientemente de la aplicación hormonal, destacando el rol del volumen disponible para el desarrollo radicular en la determinación de la calidad global de la plántula.

En este sentido, el ICD fue significativamente mayor en el tubete grande, mientras que los tubetes cuadrado y chico presentaron valores inferiores y estadísticamente similares entre sí. Resultados similares han sido reportados por Caldeira et al. (2012), quienes señalan que valores más elevados de este índice se asocian con una mejor calidad de planta. Dado que el ICD integra variables morfológicas y de biomasa, estos resultados indican que el mayor volumen de tubete permitió un mejor balance estructural de la planta, con una combinación favorable de diámetro, altura y distribución de biomasa. En este contexto, cuanto mayor es el valor del ICD, mejor es la calidad de la plántula producida (Caldeira et al., 2012).

En conjunto, los resultados muestran que la aplicación hormonal modificó la asignación de biomasa, favoreciendo el desarrollo radicular en detrimento de la parte aérea, lo que se reflejó en menores índices de robustez y menores relaciones parte

aérea/raíces. No obstante, los tratamientos con aplicación hormonal presentaron valores adecuados del índice de calidad de Dickson, lo que indica que los cambios en la asignación de biomasa no comprometieron la calidad integral de las plantas bajo las condiciones del ensayo. Por otro lado, el tamaño del tubete, especialmente el tubete grande, tuvo un efecto positivo sobre el ICD, evidenciando una mejor calidad integral de los plantines. Este comportamiento concuerda con lo señalado por Binotto et al. (2010), quienes indican que una mayor calidad de planta se asocia a mayores valores de diámetro al cuello, mayor acumulación de materia seca aérea y, en consecuencia, a valores más elevados del índice de calidad de Dickson. En este contexto, la calidad de planta no depende de un único índice, sino de la interacción entre la arquitectura aérea, el desarrollo radicular y el volumen del tubete, lo que refuerza la necesidad de un enfoque integrado en la evaluación morfológica de plantines forestales.

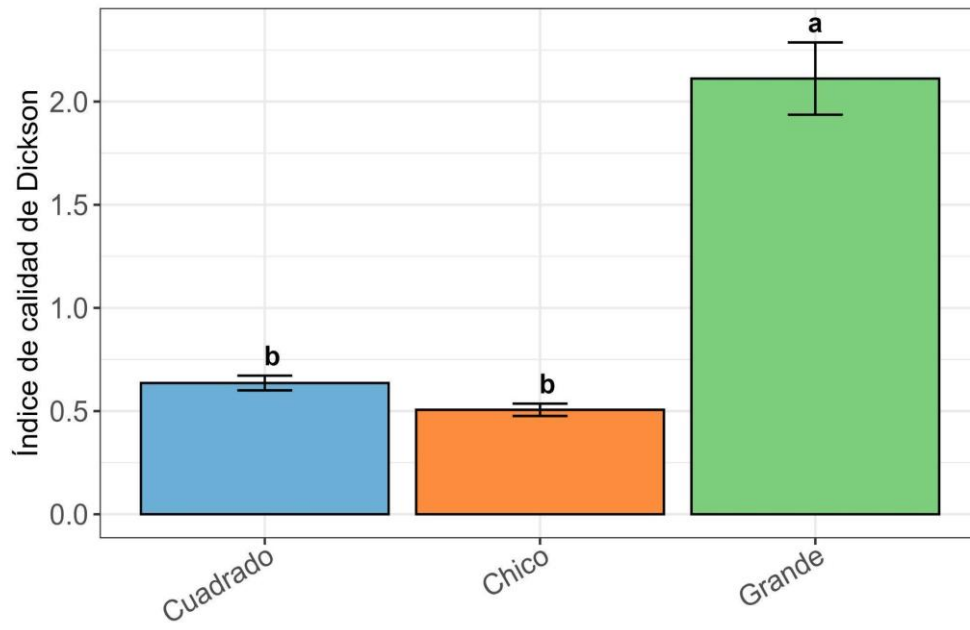
Al comparar los valores del ICD obtenidos en el presente estudio con los reportados por Storck et al. (2016), se observan diferencias marcadas en magnitud, asociadas tanto al volumen del tubete como a las condiciones de producción y a la especie evaluada. Dichos autores, registraron valores de ICD de 0,03, 0,04 y 0,10, respectivamente, evidenciando un incremento progresivo del índice a medida que aumenta el volumen del tubete.

En el presente estudio, los valores de ICD resultaron considerablemente superiores para todos los tipos de tubete. El Tubete 1 presentó valores de 0,58 SA y 0,70 en A, mientras que el Tubete 2 registró valores de 0,39 (SA) y 0,62 (A). En contraste, el Tubete 3 mostró los valores más elevados del índice, con 2,10 (SA) y 2,12 (A), reflejando un aumento sustancial del ICD en el tubete de mayor volumen.

Asimismo, los tratamientos con aplicación hormonal tendieron a presentar los valores más altos de ICD, independientemente del tipo de tubete, sin embargo, estas diferencias no resultaron estadísticamente significativas. No obstante, los valores registrados se ubicaron mayoritariamente en el rango de calidad alta según los criterios propuestos por Sáenz Reyes et al. (2010), quienes señalan que valores de ICD superiores a 0,5 corresponden a plantines de alta calidad en viveros forestales.

Figura 16

Índice de calidad de Dickson en función del tipo de tubete



5. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que el tamaño del tubete fue el factor que mayor influencia ejerció sobre el crecimiento y la calidad de los plantines, seguido por el tratamiento hormonal y la interacción entre ambos factores. En términos generales, el volumen del tubete condicionó principalmente el desarrollo morfológico de las plantas, mientras que la aplicación hormonal modificó la asignación de biomasa y algunos indicadores funcionales de calidad, evidenciando que el mayor tamaño de planta no necesariamente se asocia con una mejor calidad integral.

En particular, los plantines producidos en tubetes de mayor volumen sin aplicación hormonal presentaron los mayores valores de DC, siguiendo la tendencia general observada en las variables de crecimiento.

En relación con la altura, se observó una tendencia consistente hacia mayores valores en los tratamientos sin aplicación de ANA. De acuerdo con los rangos recomendados por Gomes et al. (2002) y considerando las alturas medias presentadas en la tabla 2, los tratamientos que se ajustaron a dichos valores correspondieron al tubete 1 SA y al tubete 3 A, lo que indica que la aplicación hormonal no resulta indispensable para alcanzar valores de altura adecuados para la plantación.

El crecimiento morfológico y la acumulación de biomasa (PSH, PST, PSR y PSTT) fueron mayores en los tubetes de mayor volumen, mientras que la aplicación hormonal mostró un efecto variable según el tipo de tubete, sin modificar la tendencia general impuesta por el volumen del tubete.

El índice de robustez presentó un efecto significativo del tratamiento hormonal y de la interacción T×H, registrándose valores más bajos en los tratamientos con aplicación, los cuales se ubicaron dentro del rango considerado óptimo, aun cuando los plantines presentaron menor tamaño aparente. La aplicación hormonal también influyó significativamente sobre la relación AR y la relación PSH/PSR, reduciendo ambos índices y favoreciendo un mayor desarrollo radicular relativo.

En cuanto al índice de calidad de Dickson (ICD), se evidenció un efecto significativo del tamaño del tubete; no obstante, los tratamientos con aplicación hormonal tendieron a presentar los valores más elevados de ICD, ubicándose mayoritariamente en el rango de calidad alta según los criterios propuestos por Sáenz Reyes et al. (2010). En este marco, los tratamientos con aplicación hormonal mostraron mejores respuestas que los tratamientos sin aplicación en términos de indicadores de calidad.

En este sentido, los resultados ponen de manifiesto que las variables morfológicas no deben evaluarse de manera aislada, ya que determinados tratamientos pueden favorecer algunos atributos de crecimiento sin necesariamente traducirse en una mejora global de la calidad de la planta.

En conjunto, los resultados evidencian que el volumen del tubete y la aplicación hormonal cumplen roles complementarios en la calidad de los plantines, mientras el tamaño del tubete define principalmente el crecimiento morfológico, el tratamiento hormonal contribuye a mejorar el equilibrio funcional de la planta, favoreciendo atributos

asociados a la calidad integral. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar ambos factores de manera conjunta en la producción. En este marco, se sugiere continuar el estudio mediante evaluaciones en campo que permitan verificar si lo indicado por los índices de calidad se refleja efectivamente en el desempeño observado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Antón Piquero, A. I., & Sans, C. (s.f.). *Alternativas de uso múltiple forestal en Uruguay*. FAO. <https://www.fao.org/4/xii/0677-b4.htm>
- Balmelli, G., Resquín, F., & Trujillo, I. (2001). Evaluación de fuentes de semilla de las principales especies de *Eucalyptus*. En Z. Bennadji (Ed.), *Seminario de actualización en tecnologías forestales para areniscas de Tacuarembó y Rivera* (pp. 67-87). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8579/1/ST-123-Balmelli-p.67-87.pdf>
- Binotto, A. F., Lúcio, A. D., & Lopes, S. J. (2010). Correlations between growth variables and the Dickson quality index in forest seedlings. *Cerne*, 16(4), 457-464. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000400005>
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, M., McDonald, M., & Turner, J. D. (Eds.). (2006). *Forest trees of Australia* (5th ed.). CSIRO. https://books.google.com.uy/books?id=CRQg11hSJ1kC&printsec=frontcover&dq=Forest+trees+of+australia&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=Forest%20trees%20of%20australia&f=false
- Bolaño Méndez, S., Fioravanzo Siri, E., & Pattarino Seijas, M. (2023). *Efecto de la aplicación de reguladores de crecimiento en el desarrollo radicular de plantines de Eucalyptus smithii* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/43763>
- Brussa, C. A. (1994). *Eucalyptus: Especies de cultivo más frecuente en Uruguay y regiones de clima templado*. Hemisferio Sur.
- Caldeira, M. V. W., Delarmelina, W. M., Lübe, S. G., Gomes, D. R., Gonçalves, E. O., & Alves, A. F. (2012). Biossólido na composição de substrato para a produção de mudas de *Tectona grandis*. *Floresta*, 42(1), 77-84.
- Carneiro, J. G. A. (1995). *Produção e controle de qualidade de mudas florestais*. Universidade Federal de Viçosa.

- Casimiro, I., Marchant, A., Bhalerao, R. P., Beeckman, T., Dhooge, S., Swarup, R., Graham, N., Inzé, D., Sandberg, G., Casero, P. J., & Bennett, M. (2001). Auxin transport promotes *Arabidopsis* lateral root initiation. *The Plant Cell*, 13(4), 843-852.
- Castaña, J., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- De Benedetti, F., & Freire, J. (2019). *Etiología de la podredumbre radicular y muerte de plantas jóvenes de Eucalyptus smithii* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/28944>
- Del Castillo, E. M., & Gil, M. N. (2012). *Vivero forestal: Cartilla teórico-práctica*. Universidad Nacional de Salta.
- Dickson, A., Leaf, A. L., & Hosner, J. F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle*, 36(1), 10-13. <https://pubs.cif-ifc.org/doi/epdf/10.5558/tfc36010-1>
- Dirección General Forestal. (2022). *Vigésima primera encuesta de viveros forestales: Año 2021*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/informe%20final.pdf>
- Dirección General Forestal. (2025). *Presentación de la Cartografía Forestal Nacional 2024*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/presentacion-cartografia-forestal-nacional-2024>
- Dumroese, R. K., Jacobs, D. F., & Wilkinson, K. M. (2012). Fases de cultivo: Establecimiento y crecimiento rápido. En L. T. Contardi, H. E. Gonda, G. Tolone & J. Salimbeni (Coords.), *Producción de plantas en viveros forestales* (pp. 133-142). Consejo Federal de Inversiones; Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico; Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. https://www.researchgate.net/publication/272790732_Fases_de_cultivo_establecimiento_y_crecimiento_rapido

- Fernández, M., Tejero, J. R., Pérez, I., Soria, F., Ruiz, F., & López, G. (2007). Effect of copper coating nursery containers on plant growth and root morphology of *Eucalyptus globulus* Labill. cuttings and seedlings. *Silva Lusitana*, 15(2), 215-227. <https://www.researchgate.net/profile/Francisco-Soria-3/publication/262672298>
- Fonseca, E. P., Valeri, S. V., Miglioranza, E., Fonseca, N. A. N., & Couto, L. (2002). Padrão de qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume, produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. *Revista Árvore*, 26(4), 515-523. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000400015>
- Freitas, T. A. S., Fonseca, M. D. S., Souza, S. S. M. de, Lima, T. M., Mendonça, A. V. R., & Santos, A. P. (2013). Crescimento e ciclo de produção de mudas de *Eucalyptus* em recipientes. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 33(76), 419-428.
- Fukaki, H., Okushima, Y., & Tasaka, M. (2007). Auxin-mediated lateral root formation in higher plants. *International Review of Cytology*, 256, 111-137.
- Fukaki, H., & Tasaka, M. (2009). Hormone interactions during lateral root formation. *Plant Molecular Biology*, 69(4), 437-449.
- Gomes, D. R., Caldeira, M. V. W., Delarmelina, W. M., Gonçalves, E. O., & Trazzi, P. A. (2013). Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona grandis* L. *Cerne*, 19(1), 123-131.
- Gomes, J. M., Couto, L., Leite, H. G., Xavier, A., & Garcia, S. L. R. (2002). Parâmetros morfológicos na avaliação da qualidade de mudas de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, 26(6), 655-664. <https://www.scielo.br/j/rarv/a/cCfXhbwHwJ4LLmFpXZJfH6x/?format=pdf&lang=pt>
- Grossnickle, S. C. (2000). *Ecophysiology of northern spruce species: The performance of planted seedlings*. NRC Research Press.
- Grossnickle, S. C. (2005). Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests*, 30(2-3), 273-294.
- Grossnickle, S. C. (2012). Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, 43, 711-738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>

- Grossnickle, S. C., & Ivetić, V. (2022). Root system development and field establishment: Effect of seedling quality. *New Forests*, 53, 1021-1067.
<https://doi.org/10.1007/s11056-022-09916-y>
- Grossnickle, S. C., & MacDonald, J. E. (2018). Seedling quality: History, application, and plant attributes. *Forests*, 9(5), Artículo e283.
<https://doi.org/10.3390/f9050283>
- Haase, D. L., Bouzza, K., Emerton, L., Friday, J. B., Lieberg, B., Aldrete, A., & Davis, A. S. (2021). The high cost of the low-cost polybag system: A review of nursery seedling production systems. *Land*, 10(8), Artículo e826.
<https://doi.org/10.3390/land10080826>
- Haase, D. L., & Davis, A. S. (2017). Developing and supporting quality nursery facilities and staff are necessary to meet global forest and landscape restoration needs. *Reforesta*, 4, 69-93.
- Hartmann, H. T., Kester, D. E., & Davies, F. T. (1990). *Plant propagation: Principles and practices* (5th ed.). Prentice-Hall.
- Hermann, R. K. (1964). Importance of Top-root ratios for survival of Douglas-Fir seedlings. *Tree Planters' Notes*, 64, 7-11.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco de datos agroclimáticos*.
<https://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Ivanchenko, M. G., Muday, G. K., & Dubrovsky, J. G. (2008). Ethylene–auxin interactions regulate lateral root initiation and emergence in *Arabidopsis thaliana*. *The Plant Journal*, 55(2), 335-347.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-313X.2008.03528.x>
- Jing, H., & Strader, L. C. (2019). Interplay of auxin and cytokinin in lateral root development. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(3), Artículo e486.
<https://doi.org/10.3390/ijms20030486>
- Kinghorn, J. M. (1978). Minimizing root problems through container design. En E. Van Eerden & J. Kinghorn (Eds.), *Proceedings of the Root Form of Planted Trees Symposium* (pp. 311-318). British Columbia Ministry of Forests.

- Kul, R., Ekinci, M., Turan, M., Ors, S., & Yildirim, E. (2020). How abiotic stress conditions affect plant roots. En E. Yildirim, M. Turan, & M. Ekinci (Eds.), *Plant roots*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95286>
- Landis, T. D., Luna, T., & Dumroese, R. K. (2014). Contenedores. En K. M. Wilkinson, T. D. Landis, D. L. Haase, B. F. Daley & R. K. Dumroese (Eds.), *Manual de viveros tropicales: Guía para iniciar y operar un vivero de plantas nativas y tradicionales* (pp. 123-139). USDA. <https://rngr.net/publications/manual-de-viveros-tropicales>
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. (1989). *The container tree nursery manual: Vol. 4. Seedling nutrition and irrigation*. USDA. <https://rngr.net/publications/ctnm/volume-4>
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. (1990). *The container tree nursery manual: Vol. 2. Containers and growing media*. USDA. <https://rngr.net/publications/ctnm/volume-2>
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. (1995). *The container tree nursery manual: Vol. 1. Nursery planning, development, and management*. USDA. <https://rngr.net/publications/ctnm/volume-1>
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. (1999). *The container tree nursery manual: Vol.6. Seedling propagation*. USDA. <https://rngr.net/publications/ctnm/volume-6>
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. (2010). *The container tree nursery manual: Vol. 7. Seedling processing, storage, and outplanting*. USDA. <https://rngr.net/publications/ctnm/volume-7>
- Laplaze, L., Benkova, E., Casimiro, I., Maes, L., Vanneste, S., Swarup, R., Weijers, D., Calvo, V., Parizot, B., Herrera-Rodriguez, M. B., Offringa, R., Graham, N., Doumas, P., Friml, J., Bogusz, D., Beeckman, T., & Bennett, M. (2007). Cytokinins act directly on lateral root founder cells to inhibit root initiation. *The Plant Cell*, 19(12), 3889-3900. <https://biblio.ugent.be/publication/409497>
- Laskowski, M. J., Williams, M. E., Nusbaum, H. C., & Sussex, I. M. (1995). Formation of lateral root meristems is a two-stage process. *Development*, 121(10), 3303-3310.

- Le, J., Vandenbussche, F., Van Der Straeten, D., & Verbelen, J. P. (2001). In the early response of *Arabidopsis* roots to ethylene, cell elongation is up- and down-regulated and uncoupled from differentiation. *Plant Physiology*, 125(2), 519-522. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1539361/pdf/hw0519.pdf>
- Linde, C., Kemp, G. H. J., Wingfield, M. J. (1994). Pythium and Phytophthora species associated with eucalypts and pines in South Africa. *European Journal of Forest Pathology*, 24(6-7), 345-356. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0329.1994.tb00828.x>
- Ljung, K., Hull, A. K., Celenza, J., Yamada, M., Estelle, M., Normanly, J., & Sandberg, G. (2005). Sites and regulation of auxin biosynthesis in *Arabidopsis* roots. *The Plant Cell*, 17(4), 1090-1104.
- Mafia, R. G., Alfnas, A. C., Siqueira, L., Ferreira, E. M., Leite, H. G., & Cavallazzi, J. R. P. (2005). Critério técnico para determinação da idade ótima de mudas de eucalipto para plantio. *Revista Árvore*, 29(6), 947-953. <https://www.redalyc.org/pdf/488/48829614.pdf>
- Malamy, J. E. (2009). *Lateral root formation*. En T. Beeckman (Ed), *Annual plant reviews: Root development* (Vol. 37, pp. 83-126). Wiley-Blackwell.
- Manual de vivero*. (s.f.). Buenos Aires Provincia; INTA; Ministerio de Agroindustria. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/manual_de_vivero_2do_ano.pdf
- Marhavý, P., Bielach, A., Abas, L., Abuzeineh, A., Duclercq, J., Tanaka, H., Pařezová, M., Petrášek, J., Friml, J., Kleine-Vehn, J., & Benková, E. (2011). Cytokinin modulates endocytic trafficking of PIN1 auxin efflux carrier to control plant organogenesis. *Developmental Cell*, 21(4), 796-804. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2011.08.014>
- Marhavý, P., Duclercq, J., Weller, B., Feraru, E., Bielach, A., Offringa, R., Friml, J., Schwechheimer, C., Murphy, A., & Benková, E. (2014). Cytokinin controls polarity of PIN1-dependent auxin transport during lateral root organogenesis. *Current Biology*, 24(9), 1031-1037. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.04.002>
- Mariotti, B., Maltoni, A., Chiarabaglio, P. M., Giorcelli, A., Jacobs, D. F., Tognetti, R., & Tani, A. (2015). Can the use of large, alternative nursery containers aid in field establishment of *Juglans regia* and *Quercus robur* seedlings? *New Forests*, 46, 773-794. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9505-5>

- Mariotti, B., Maltoni, A., Jacobs, D. F., & Tani, A. (2015). Container effects on growth and biomass allocation in *Quercus robur* and *Juglans regia* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30(5), 401-415.
<http://dx.doi.org/10.1080/02827581.2015.1023352>
- May, J. T. (1984). *Lifting and field packing*. En J. May, E. Belcher, C. Cordell, T. Filer, D. South & C. Lantz (Eds.), *Southern Pine Nursery Handbook* (pp. 8-1-8-21). USDA.
- McDonald, S. E., Tinus, R. W., & Reid, C. P. P. (1984). Modification of ponderosa pine root systems in containers. *Journal of Environmental Horticulture*, 2(1), 1-5.
<https://doi.org/10.24266/0738-2898-2.1.1>
- Mexal, J. G., & Landis, T. D. (1990). Target seedling concepts: Height and diameter. En R. Rose, S. J. Campbell & T. D. Landis (Eds.), *Proceedings of the Target Seedling Symposium: Combined Meeting of the Western Forest Nursery Associations* (pp. 17-35). USDA.
<https://rngr.net/publications/proceedings/1990/mexal.pdf>
- Molina, M. P., Barros, D., & Ipinza, R. (1992). Análisis de distintos contenedores para la producción de plantas de *Eucalyptus globulus* Labill. *Ciencia e Investigación Forestal*, 6(2), 169-193.
<https://revista.infor.cl/index.php/infor/article/view/171/165>
- Morales Pérez, E. (2018). *Indicadores de calidad de planta en viveros forestales del estado de Tamaulipas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Académico Digital de la UANL.
<http://eprints.uanl.mx/id/eprint/15965>
- Morris, D. A., Friml, J., & Zažímalová, E. (2010). The transport of auxins. En P. J. Davies (Ed.), *Plant hormones: Biosynthesis, signal transduction, action!* (3ª ed., pp. 437-470). Springer.
- Nelson, W. R. (1989). A review of the role of root pruning for container forest seedlings. *South African Forestry Journal*, 151(1), 90-92.
https://doi.org/10.1080/00382167.1989.9630511?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle

- Nelson, W. R. (1996). Container types and containerised stock for New Zealand afforestation. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 26(1-2), 184-190.
https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0005/59549/NZJFS261-21996NELSON184-190.pdf
- Nelson, W. R. (1999). Root pruning can influence first order lateral root development of containerised plants. *Combined Proceedings - International Plant Propagators' Society*, 49, 96-103.
https://www.academia.edu/18786665/Root_Pruning_Can_Influence_First_Order_Lateral_Root_Development_of_Containerised_Plants
- Olatunji, D., Geelen, D., & Verstraeten, I. (2017). Control of endogenous auxin levels in plant root development. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(12), Artículo e2587. <https://doi.org/10.3390/ijms18122587>
- Ortega, U., Majada, J., Mena-Petite, A., Sanchez-Zabala, J., Rodriguez-Iturrizar, N., Txarterina, K., Azpitarte, J., & Duñabeitia, M. (2006). Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of containers. *New Forests*, 31(1), 97-112. <https://doi.org/10.1007/s11056-004-7364-6>
- Overvoorde, P., Fukaki, H., & Beeckman, T. (2010). Auxin control of root development. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 2(6), Artículo e001537.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2869515/pdf/cshperspect-AUX-a001537.pdf>
- Piñuela, A., Guerra, A., & Pérez-Sánchez, E. (2013). *Guía para el establecimiento y manejo de viveros agroforestales*. Fundación Danac.
<https://www.researchgate.net/publication/278679789>
- Pita Villamil, M., & Pérez García, F. (1998). *Germinación de semillas*. Ministerio De Agricultura, Pesca y Alimentación.
https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/hojas/hd_1998_2090.pdf
- Proyectos: Obtención de semillas seleccionadas localmente de eucaliptus y pinos.* (s.f.). INIA. <https://inia.uy/proyectos/obtencion-de-semilla-seleccionada-localmente-de-eucaliptus-y-pinos>
- Quiroz, I., Chung, P., García, E., González, M., & Soto, H. (2009). *Vivero forestal: Producción de plantas nativas a raíz cubierta*. INFOR.

- Rachid, C., Resquín, F., Balmelli, G., & Scoz, R. (2021). Eucalyptus smithii: Una especie de interés creciente en la región sureste. *Revista INIA*, (65), 71-74.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15767/1/Revista-INIA-65-Junio-2021-16.pdf>
- Reed, R. C., Brady, S. R., & Muday, G. K. (1998). Inhibition of auxin movement from the shoot into the root inhibits lateral root development in *Arabidopsis*. *Plant Physiology*, 118(4), 1369-1378.
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC34753/pdf/1369.pdf>
- Reyes, J. T. S., Flores, H. J. M., Pérez, D. C. M. A., Sánchez, A. R., & Ramos, J. H. (2014). Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero "Morelia", estado de Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(26), 98-111.
- Rodríguez, T. D. A. (2008). *Indicadores de calidad de planta forestal*. Mundi-Prensa; UACH-ANCF.
- Rune, G. (2003). Slits in container wall improve root structure and stem straightness of outplanted Scots pine seedlings. *Silva Fennica*, 37(3), 333-342.
<https://doi.org/10.14214/sf.493>
- Sáenz Reyes, J. T., Villaseñor Ramírez, F. J., Muñoz Flores, H. J., Rueda Sánchez, A., & Prieto Ruíz, J. Á. (2010). *Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán, México*. INIFAP.
<https://1library.co/document/q05or5v9-calidad-planta-viveros-forestales-clima-templado-michoac%C3%A1n.html>
- Santos, C. B. (2000). Efeito do volume do tubete e do tipo de substrato na qualidade de mudas de *Cryptomeria japonica*. *Ciencia Florestal*, 10(2), 115-123.
- Sasse, J., & Sands, R. (1997). Configuration and development of root systems of cuttings and seedlings of *Eucalyptus globulus*. *New Forests*, 14(2), 85-105.
- Schwartz, G., Rocha, T. da S., Almeida, M. J. S de., Dionisio, L. F. S., & Corvera, R. (2022). Seedlings quality of *Bertholletia excelsa* Bonpl. (Lecythidaceae) produced in forest nursery. *Agriculture & Forestry*, 68(1), 219-232.
<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1153118/1/SEEDLING-S-QUALITY.pdf>

- Sheridan, R. A., & Davis, A. S. (2021). Characterizing the utility of the root-to-shoot ratio in *Douglas-fir* seedling production. *Forests*, 12(12), Artículo e1745. <https://doi.org/10.3390/f12121745>
- Smith, I. E., & McCubbin, P. D. (1992). Effect of copper tray treatment on *Eucalyptus grandis* (Hill ex Maiden) seedling growth. *Acta Horticulturae*, (319), 371-376. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1992.319.57>
- South, D. B. (1987). Re-evaluation of Wakeley's 'critical tests' of morphological grading of southern pine nursery stock. *South African Forestry Journal*, 142, 56-59.
- Storck, E. B., Schorn, L. A., & Fenilli, T. A. B. (2016). Crescimento e qualidade de mudas de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* em diferentes recipientes. *Floresta*, 46(1), 39-46. <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/38907>
- Sun, C. H., Yu, J. Q., & Hu, D. G. (2017). Nitrate: A crucial signal during lateral roots development. *Frontiers in Plant Science*, 8, Artículo e485. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2017.00485/full>
- Sutton, R. F. (1969). *Form and development of conifer root systems*. Commonwealth Forestry Bureau.
- Sutton, R. F. (1980). Root system morphogenesis. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 10, 264-292. https://www.scionresearch.com/_data/assets/pdf_file/0008/36809/NZJFS1011980SUTTON264_292.pdf
- Thompson, B. E. (1985). Seedling morphological evaluation: What you can tell by looking. En M. L. Duryea (Ed.), *Evaluating seedling quality: Principles, procedures, and predictive abilities of major tests* (pp. 59-72). Oregon State University Forest Research Laboratory.
- Vernengo, R. (2000). Estudios de germinación en tres especies del género *Nothoscordum* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/25683>
- Villalón-Mendoza, H. (2016). Indicadores de calidad de la planta de *Quercus canbyi* Trel. (encino) en vivero forestal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 12(1), 46-52.

Villar-Salvador, P., Puértolas, J., Cuesta, B., Peñuelas, J. L., Uscola, M., Heredia-Guerrero, N., & Rey Benayas, J. M. (2012). Increase in size and nitrogen concentration enhances seedling survival in Mediterranean plantations: Insights from an ecophysiological conceptual model of plant survival. *New Forests*, 43(5-6), 755-770.

Woodward, A. W., & Bartel, B. (2005). Auxin: Regulation, action, and interaction. *Annals of Botany*, 95(5), 707-735.

7. ANEXOS

Anexo A. Tablas estadísticas

Tabla A1*Resultados primera evaluación*

Tub	Rep	DC	H	PSH	PST	PSR	PSTT	HD	AR	PSH/PSR	ICD
1	1	0,60	13,40	0,222	0,050	0,331	0,60	22,33	821,8	670,7	0,7
1	2	0,35	13,90	0,230	0,042	0,249	0,52	39,71	1092,4	923,7	0,5
1	3	0,45	16,70	0,115	0,054	0,258	0,43	37,11	655,0	445,7	0,6
1	4	0,26	10,40	0,070	0,027	0,120	0,22	40,00	808,3	583,3	0,3
1	5	0,50	14,00	0,212	0,056	0,252	0,52	28,00	1063,5	841,3	0,5
1	1	0,60	18,60	0,312	0,094	0,399	0,81	31,00	1017,5	782,0	0,8
1	2	0,49	17,60	0,318	0,066	0,350	0,73	35,92	1097,1	908,6	0,6
1	3	0,31	16,80	0,190	0,035	0,213	0,44	54,19	1056,3	892,0	0,4
1	4	0,40	15,50	0,083	0,068	0,142	0,29	38,75	1063,4	584,5	0,3
1	5	0,70	16,70	0,168	0,057	0,248	0,47	23,86	907,3	677,4	0,5
1	1	0,47	16,10	0,379	0,058	0,476	0,91	34,26	918,1	796,2	1,0
1	2	0,47	13,50	0,215	0,060	0,081	0,36	28,72	3395,1	2654,3	0,1
1	3	0,62	17,20	0,200	0,058	0,099	0,36	27,74	2606,1	2020,2	0,1
1	4	0,49	13,40	0,182	0,046	0,187	0,42	27,35	1219,3	973,3	0,3
1	5	0,44	13,00	0,206	0,050	0,155	0,41	29,55	1651,6	1329,0	0,2
2	1	0,49	17,10	0,30	0,067	0,245	0,61	34,90	1485,7	1212,2	0,4
2	2	0,41	14,50	0,088	0,043	0,199	0,33	35,37	658,3	442,2	0,5
2	3	0,55	18,30	0,224	0,094	0,251	0,57	33,27	1266,9	892,4	0,4
2	4	0,35	10,50	0,059	0,051	0,147	0,26	30,00	748,3	401,4	0,3
2	5	0,69	16,50	0,301	0,075	0,240	0,62	24	1566,7	1254,2	0,4
2	1	0,79	22,10	0,441	0,118	0,351	0,91	27,97	1592,6	1256,4	0,6
2	2	0,28	14,60	0,164	0,069	0,268	0,50	52,14	869,4	611,9	0,5
2	3	0,63	17,10	0,164	0,112	0,250	0,53	27,14	1104,0	656,0	0,5
2	4	0,67	16,40	0,249	0,100	0,099	0,45	24,48	3525,3	2515,2	0,1
2	5	0,53	14,30	0,08	0,072	0,161	0,31	26,98	944,1	496,9	0,3
2	1	0,47	11,00	0,044	0,031	0,150	0,23	23,40	500,0	293,3	0,4
2	2	0,61	15,90	0,124	0,055	0,287	0,47	26,07	623,7	432,1	0,7
2	3	0,42	13,00	0,177	0,031	0,263	0,47	30,95	790,9	673,0	0,6
2	4	0,39	14,90	0,058	0,055	0,199	0,31	38,21	567,8	291,5	0,5
2	5	0,78	18,90	0,348	0,079	0,383	0,81	24,23	1114,9	908,6	0,7
3	1	0,49	9,40	0,171	0,107	0,071	0,35	19,18	3915,5	2408,5	0,1
3	2	0,69	14,70	0,231	0,112	0,178	0,52	21,30	1927,0	1297,8	0,3
3	3	0,58	16,60	0,19	0,094	0,127	0,41	28,62	2236,2	1496,1	0,2
3	4	0,89	22,40	0,54	0,169	0,292	1,00	25,17	2428,1	1849,3	0,4
3	5	0,82	16,80	0,379	0,248	0,17	0,80	20,49	3688,2	2229,4	0,2
3	1	0,90	17,10	0,433	0,135	0,305	0,87	19,00	1862,3	1419,7	0,5
3	2	0,47	15,00	0,364	0,13	0,156	0,65	31,91	3166,7	2333,3	0,2
3	3	0,70	15,90	0,171	0,126	0,055	0,35	22,71	5400,0	3109,1	0,1

3	4	0,72	13,30	0,157	0,132	0,259	0,55	18,47	1115,8	606,2	0,5
3	5	0,75	18,40	0,584	0,180	0,556	1,32	24,53	1374,1	1050,4	0,9
3	1	0,86	12,40	0,274	0,090	0,15	0,51	14,42	2426,7	1826,7	0,2
3	2	0,68	18,20	0,331	0,149	0,233	0,71	26,76	2060,1	1420,6	0,3
3	3	0,54	13,60	0,241	0,111	0,202	0,55	25,19	1742,6	1193,1	0,3
3	4	0,79	16,80	0,400	0,121	0,313	0,83	21,27	1664,5	1278,0	0,5
3	5	0,61	16,50	0,445	0,149	0,297	0,89	27,05	2000,0	1498,3	0,4

Nota. Tub: Tubete, DC: Diámetro, H: Altura, PSH: Peso seco de hoja, PST: Peso seco de tallo, PSR: Peso seco de raíz, PSTT: Peso seco total, HD: relación altura/diámetro, AR: relación aérea/radicular, PSH/PSR: relación peso seco de hojas/peso seco radicular, ICD: Índice de calidad de Dickson.

Tabla A2

Resumen de los resultados finales

Tub	Hor	Rep	DC	H	HD	PSH	PST	PSR	PSTT	AR	PSH/PSR	ICD
1	A	1	2.26	19.09	8.68	0.16	0.17	0.29	0.62	1249.48	570.75	0.58
1	A	2	2.39	20.79	8.84	0.26	0.23	0.37	0.86	1475.84	769.11	0.68
1	A	3	2.38	18.35	7.75	0.33	0.23	0.43	0.99	1286.18	706.14	0.81
1	SA	1	3.40	26.91	10.43	0.65	0.44	0.40	1.49	3006.51	1828.46	0.57
1	SA	2	2.51	28.04	11.34	0.50	0.39	0.41	1.31	2171.58	1213.36	0.63
1	SA	3	2.28	24.83	11.01	0.41	0.34	0.34	1.08	2195.55	1148.75	0.54
2	A	1	2.22	19.48	8.78	0.24	0.23	0.36	0.82	1346.20	654.73	0.68
2	A	2	2.09	18.10	8.71	0.16	0.19	0.33	0.67	1080.15	467.85	0.68
2	A	3	2.10	16.15	7.93	0.19	0.14	0.26	0.59	1453.17	732.94	0.51
2	SA	1	2.33	20.53	8.84	0.37	0.28	0.27	0.92	2395.07	1375.68	0.39
2	SA	2	2.24	21.69	9.90	0.37	0.28	0.25	0.90	2640.51	1544.84	0.36
2	SA	3	2.42	24.05	10.11	0.45	0.45	0.30	1.06	2602.81	1507.38	0.42
3	A	1	3.03	26.75	9.04	0.48	0.48	0.78	1.67	1215.17	615.29	1.54
3	A	2	3.06	25.49	8.85	0.49	0.49	0.88	1.82	1580.24	854.91	2.71
3	A	3	3.02	24.21	8.11	0.56	0.42	0.93	1.91	1086.29	596.40	2.13
3	SA	1	4.36	42.84	10.15	1.63	1.35	1.35	4.33	2583.41	1422.37	2.06
3	SA	2	4.59	41.28	9.23	1.96	1.35	1.34	4.65	2628.48	1589.05	1.96
3	SA	3	4.00	34.09	8.84	1.55	1.04	1.27	3.86	2928.26	1858.03	2.28

Nota. Tub: Tubete, Hor: Hormona, DC: Diámetro, H: Altura, PSH: Peso seco de hoja, PST: Peso seco de tallo, PSR: Peso seco de raíz, PSTT: Peso seco total, HD: relación altura/diámetro, AR: relación aérea/radicular, PSH/PSR: relación peso seco de hojas/peso seco radicular, ICD: Índice de calidad de Dickson.

Tabla A3

Resultado de las pruebas de normalidad, homogeneidad de varianza y de independencia de los residuos

	Prueba de normalidad de los residuos	Prueba de homogeneidad de varianza de los residuos	Prueba de independencia de los residuos
	p-valor	p-valor	p-valor
DC	0,5348	aprobación método gráfico	aprobación método gráfico
H	0,277	0,0749	aprobación - método gráfico
HD	0,14480	aprobación método gráfico	aprobación método gráfico
PSH	0,3283	0,07407	0,5553
PST	0,4460	aprobación - método gráfico	aprobación - método gráfico
PSR	0,3360	0,239	0,0594
PST	0,9608	0,08886	0,1228
AR	0,2835	0,09221	0,587
PSH/PS	0,4686	0,09007	0,1979
R			
ICD	0,4434	0,05202	0,8317

Anexo B. Registro fotográfico del proceso experimental

Figura B1

Medición de diámetro con calibrador

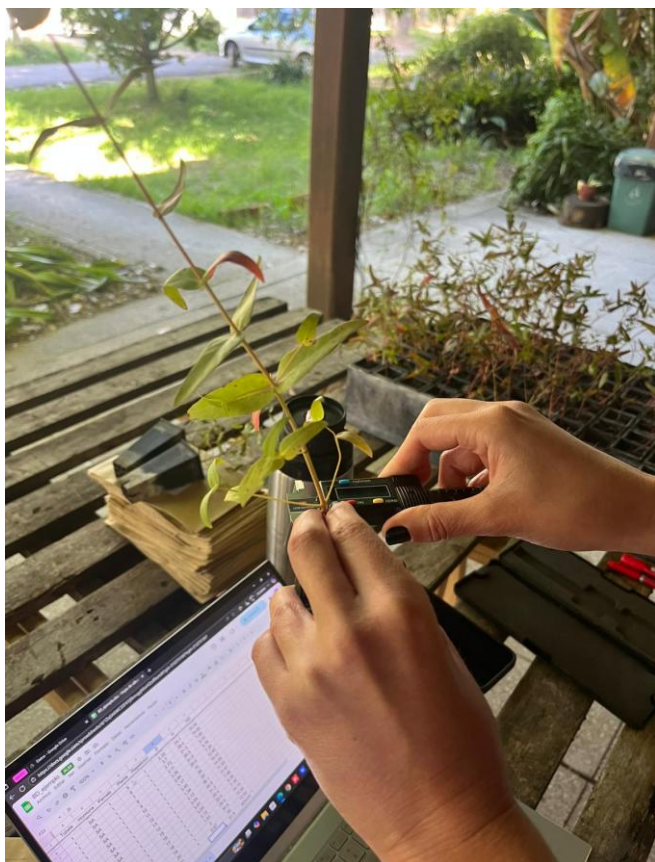


Figura B2

Medición de altura de plantines



Figura B3

Corte de tallos para la posterior determinación de su peso



Figura B4

Medición de peso seco de hojas en balanza de precisión



Figura B5

Medición de peso seco de tallos en balanza de precisión



Figura B6

Medición de peso seco de raíces en balanza de precisión



Figura B7

Desarrollo del sistema radicular en tubete de mayor volumen



Figura B8
Sistema radicular desarrollado



Figura B9

Aplicación de reguladores de crecimiento



Figura B10

Aplicación de reguladores de crecimiento

