

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**  
**Departamento de Ambiente y Desarrollo**  
**Ingeniería en Ambiente y Desarrollo**



**Proyecto Especial de Graduación**  
**Evaluación de cinco métodos de propagación para restauración**  
**ecosistémica de bosques en Uyuca, Honduras**

**Estudiante**

**Ashlie Alexandra Alvarado Espinales**

**Asesores**

**Josué Aníbal León Carvajal, Mtr.**

**Félix Edgardo Mancía Suazo, Ing.**

**Honduras, agosto 2025**

**Autoridades**

**KEITH ANDREW**

Rector i.a.

**ANA M. MAIER ACOSTA**

Vicepresidenta y Decana Académica

**VICTORIA CORTÉS MATAMOROS**

Directora del Departamento de Ambiente y Desarrollo

**JULIO NAVARRO**

Secretario General

### **Agradecimientos**

La realización de esta investigación fue posible gracias al valioso apoyo y colaboración de diversas personas e instituciones, a quienes expreso mi más sincero agradecimiento.

A la Fundación Peterson por brindarme la oportunidad de estudiar en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, y por su apoyo financiero que hizo posible mi formación académica y la realización de esta investigación.

A Eden Reforestation Projects por facilitar el acceso a la información y las parcelas de restauración establecidas en bosques de Uyuca, sin cuyo trabajo previo y disposición para compartir datos este estudio no habría sido posible.

Al personal operativo de la Unidad Forestal de Zamorano, especialmente a Dustin Joel López y Alonso Carrasco por su invaluable acompañamiento durante toda la fase de campo de esta investigación. Asimismo, al Sr. Jaime Vásquez por su apoyo logístico y durante la preparación de muestras de biomasa.

Al personal del Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo de Zamorano, en particular a la Ing. Lourdes Espinal, por su dedicación y “expertise” técnico en el análisis de las muestras de biomasa, proporcionando resultados de alta calidad que fueron esenciales para los hallazgos de esta investigación.

## Contenido

Agradecimientos .....	3
Índice de Cuadros.....	6
Índice de Figuras .....	7
Índice de Anexos .....	8
Resumen .....	9
Abstract.....	10
Introducción.....	11
Metodología.....	15
Ubicación y Área de Estudio .....	15
Análisis de Suelo .....	16
Recolección de Muestras del Suelo en Campo .....	17
Análisis de las Muestras en Laboratorio .....	18
Diseño del Muestreo de Plántulas .....	19
Evaluación de la Tasa de Supervivencia.....	19
Evaluación del Desarrollo Morfológico y Parámetros de Calidad de las Plántulas.....	20
Toma de Datos de Diámetro y Altura .....	20
Parámetros de Calidad.....	21
Caracterización de Biomasa del Estrato Herbáceo y Regeneración Natural .....	22
Biomasa del Estrato Herbáceo.....	22
Determinación de Biomasa seca.....	24
Regeneración Natural .....	25
Análisis de Datos .....	26
Resultados y Discusión.....	28
Evaluación de la Tasa de Supervivencia de Plántulas .....	28

Evaluación de Desarrollo de Plántulas en Restauración Inducida .....	31
Desarrollo Inicial - Pinus sp. (Seis Meses) .....	31
Desarrollo de plántulas de Quercus sp. (Treinta Meses) .....	33
Análisis Comparativo entre Especies .....	34
Efecto del Sitio en el Desempeño .....	34
Evaluación de Parámetros de Calidad de Plántulas .....	35
Caracterización de Biomasa del Estrato Herbáceo y Regeneración Natural .....	39
Biomasa del Estrato Herbáceo .....	39
Regeneración Natural .....	42
Integración: Biomasa Herbácea y Regeneración Natural .....	44
Conclusiones .....	46
Recomendaciones .....	47
Referencias .....	48
Anexos .....	54

**Índice de Cuadros**

Cuadro 1 Métodos de propagación y especies arbóreas inducidas en los sitios de estudio.....	16
Cuadro 2 Escala de evaluación de atributos de calidad de plántulas forestales .....	22

## Índice de Figuras

Figura 1 Ubicación geográfica de los sitios de estudio, Uyuca, Honduras.....	15
Figura 2 Ubicación de los puntos de recolección de submuestras para el análisis de suelo.....	18
Figura 3 Diseño de parcelas principales y subparcelas para evaluación de plántulas, biomasa herbácea y regeneración natural.....	23
Figura 4 Tasa de sobrevivencia por sitio, método de propagación y especie .....	29
Figura 5 Altura promedio de las plántulas de Pinus sp. de seis meses según el método de propagación en ambos sitios .....	31
Figura 6 Diámetro basal promedio de las plántulas de Pinus sp. de seis meses según el método de propagación y en ambos sitios.....	32
Figura 7 Diámetro basal y altura promedio de las plántulas de Quercus sp. de 30 meses según el método de propagación y el sitio de establecimiento .....	33
Figura 8 Frecuencia relativa de las valoraciones correspondientes a la arquitectura del tallo por método de propagación y especie.....	36
Figura 9 Frecuencia relativa de las valoraciones correspondientes al estado fitosanitario por método de propagación y especie .....	37
Figura 10 Frecuencia relativa de las valoraciones correspondientes a vigor vegetativo por método de propagación y especie .....	38
Figura 11 Presencia de biomasa (ton/ha) por método de propagación y sitio de establecimiento.....	40
Figura 12 Distribución de la producción de biomasa (ton/ha) por sitio de establecimiento .....	41
Figura 13 Densidad de individuos de cada uno de los estratos por método de propagación y sitio de estudio .....	43

### Índice de Anexos

Anexo A Metodología de recolección de muestras de suelo en campo.....	54
Anexo B Resultados del análisis de suelo .....	55
Anexo C Coordenadas UTM de la ubicación de cada parcela.....	56
Anexo D Formato utilizado para la recolección de datos en campo .....	57
Anexo E Especies establecidas de forma natural en el sitio de estudio .....	58

## Resumen

Los ecosistemas forestales de Honduras enfrentan una degradación severa debido a diversos factores. Existe limitado conocimiento sobre la efectividad de métodos de propagación para restauración forestal bajo condiciones locales. Este estudio evalúa cinco métodos de propagación (siembra directa, bolas de semillas, vivero a raíz desnuda, trasplante silvestre y planta en bolsa) para restaurar bosques de *Pinus sp.* y *Quercus sp.* entre 2022 y 2024 en Uyuca. Se implementó un diseño experimental anidado con 24 parcelas principales de 25 m<sup>2</sup> distribuidas en dos sitios (La Torre y Polvorín), incluyendo subparcelas de 4 m<sup>2</sup> y 1 m<sup>2</sup> para evaluar regeneración natural y biomasa herbácea. Las variables analizadas fueron tasas de sobrevivencia, indicadores morfológicos como altura y diámetro basal, parámetros de calidad como arquitectura del tallo, estado fitosanitario y vigor vegetativo, además de la biomasa del estrato herbáceo y regeneración natural. Los resultados evidenciaron efectividad diferencial según la interacción método-especie-sitio. Para *Pinus sp.*, planta en bolsa alcanzó mayor sobrevivencia a los 6 meses (51%) y desarrollo morfológico con 24.18 cm de altura, en suelos franco-arcillo-arenosos. Para *Quercus sp.*, la siembra directa alcanzó 44% de sobrevivencia a los 30 meses y un crecimiento superior con 36.36 cm de altura y 0.464 cm de diámetro basal, en suelos franco-arcillosos. Los parámetros de calidad favorecieron el uso de bolas de semillas para roble con 72% de arquitectura óptima, mientras que la siembra directa promovió mayor biomasa herbácea (27.40 ton/ha) y regeneración natural (3,200 brinzales/ha), aunque con cuellos de botella en la transición a estratos superiores. No se identificó un método universalmente superior; la efectividad depende de las características edáficas del sitio y los requerimientos biológicos específicos de cada especie.

*Palabras clave:* Biomasa, parcelas, plántulas, regeneración natural

### Abstract

Honduran forest ecosystems face severe degradation due to various factors. There is limited knowledge about the effectiveness of propagation methods for forest restoration under local conditions. This study evaluates five propagation methods (direct seeding, seed balls, bare-root nursery, wild transplanting, and bagged plants) to restore *Pinus sp.* and *Quercus sp.* forests between 2022 and 2024 in Uyuca. A nested experimental design was implemented with 24 main plots of 25 m<sup>2</sup> distributed across two sites (La Torre and Polvorín), including subplots of 4 m<sup>2</sup> and 1 m<sup>2</sup> to evaluate natural regeneration and herbaceous biomass. The variables analyzed were survival rates, morphological indicators such as height and basal diameter, quality parameters such as stem architecture, phytosanitary status, and vegetative vigor, as well as herbaceous layer biomass and natural regeneration. The results showed differential effectiveness depending on the method-species-site interaction. For *Pinus sp.*, bagged plants achieved higher survival at 6 months (51%) and morphological development with a height of 24.18 cm in sandy loam soils. For *Quercus sp.*, direct seeding achieved 44% survival at 30 months and superior growth with 36.36 cm in height and 0.464 cm in basal diameter in loamy-clay soils. Quality parameters favored the use of seed balls for oak with 72% optimal architecture, while direct seeding promoted greater herbaceous biomass (27.40 tons/ha) and natural regeneration (3,200 shoots/ha), although with bottlenecks in the transition to upper strata. No universally superior method was identified; effectiveness depends on the edaphic characteristics of the site and the specific biological requirements of each species.

*Keywords:* Biomass, natural regeneration, plots, seedlings

## Introducción

Los ecosistemas forestales enfrentan una significativa degradación debido a diversas actividades antropogénicas y naturales (Evans y Guariguata, 2016). La Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], (2024) reporta que, entre 1990 y 2020, la superficie mundial de bosques primarios se redujo significativamente, con una pérdida cercana a 81.3 millones de hectáreas. Factores como la deforestación, el cambio de uso de suelo y el cambio climático han intensificado este problema, afectando particularmente a regiones de alta biodiversidad como Mesoamérica (Arroyo Rodríguez et al., 2017).

Mesoamérica alberga alrededor del 12% de la biodiversidad global, a pesar de ocupar tan solo el 2% de la superficie terrestre del planeta (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources [IUCN], 2016). En este contexto, Honduras emerge como un territorio significativo para la biodiversidad de esta región, pues cuenta con 5,398,137 hectáreas de bosques que representan una cobertura forestal del 47.99% de su territorio (Centro de Información y Patrimonio Forestal [CIPF], 2014). Según Portillo Reyes et al. (2016), estos bosques constituyen una gran parte del territorio nacional, presentes en 17 de 18 departamentos, con una extensión de 4.5 millones de hectáreas.

Esta riqueza forestal enfrenta amenazas significativas, incluyendo la presencia del gorgojo descortezador del pino (*Dendroctonus frontalis*) considerado la plaga más prominente y drástica de los bosques de pino en Honduras, que ha afectado más de 500,000 ha de bosques de pino (CIPF, 2014), estableciendo la necesidad de implementar acciones que garanticen la permanencia de dicho potencial ambiental (Vargas Ríos, 2011). Ante estos desafíos, la restauración ecosistémica surge como una solución para contrarrestar estos efectos, ya que permite la recuperación de ecosistemas degradados a través de técnicas que promueven el restablecimiento de la estructura y función del bosque (Brancaion et al., 2019).

En búsqueda de soluciones, diversas organizaciones han desarrollado enfoques innovadores de restauración ecosistémica, por ejemplo, la organización no gubernamental "Eden Reforestation

Projects" que opera actualmente en 8 países y ha logrado plantar más de 800 millones de árboles a través de asociaciones comunitarias locales, ha centrado sus esfuerzos en la recuperación de extensas áreas severamente degradadas mediante la propagación de especies nativas adaptadas a las condiciones locales (Eden Reforestation Projects, 2023).

El éxito en los procesos de restauración depende en gran medida de la selección estratégica de métodos de propagación apropiados (Acero Nitola y Cortés Pérez, 2014). Las especies comúnmente utilizadas en estos procesos de restauración en Honduras incluyen el pino (*Pinus sp.*), que además de ser una especie pionera, es conocido por su rápido crecimiento y tolerancia a diferentes tipos de suelo y el roble (*Quercus sp.*), que comúnmente coexiste con especies de pinos en bosques mixtos. Su longevidad y resistencia contribuyen a la estabilidad estructural y diversidad a largo plazo en el ecosistema (Graves et al., 2014; Martínez, 2014).

Entre los métodos que se utilizaron para propagación de las especies mencionadas, se destaca la siembra directa, que resulta particularmente eficiente en ecosistemas de pino (*Pinus sp.*) y roble (*Quercus sp.*), donde las condiciones microclimáticas y edáficas son favorables para su establecimiento (Mata Balderas et al., 2010). Ferreira et al. (2023) compararon el desempeño de siembra directa frente al establecimiento de plántulas de diferentes especies de árboles tropicales, encontrando que la siembra directa es la mejor opción. Además, varios estudios documentan el éxito de este método, como la restauración de 5,000 ha de bosque en el río Xingu que fue reportado por Rodrigues et al. (2019)

Otra técnica innovadora que se implementó fue la propagación mediante bolas de semillas, que combina arcilla, compost y semillas, ofreciendo una forma de siembra eficiente y protegida. Este método es especialmente útil en áreas degradadas y remotas donde la siembra directa presenta desafíos. De igual forma, se implementó la propagación por raíz desnuda, donde las plántulas se cultivan en viveros y luego se trasplantan sin sustrato o contenedor al sitio a tratar. Este método es

comúnmente utilizado en programas de reforestación implementados en diferentes partes del mundo (Rustam et al., 2023).

El trasplante silvestre a raíz desnuda consiste en extraer plántulas que han germinado de forma natural, sin intervención humana, directamente del suelo y sin contenedor, para luego replantarlas en el área que se desea restaurar. Por último, la estrategia de trasplantar plántulas jóvenes a bolsas llenas de sustrato en el vivero, donde completan su fase inicial de desarrollo bajo condiciones controladas. Una vez alcanzado el tamaño y vigor deseados, se instalan sin la bolsa (Oliva et al., 2014).

Las semillas utilizadas para los diferentes métodos de propagación fueron recolectadas directamente del bosque en zonas representativas de la Reserva Forestal Uyuca por el equipo del proyecto Eden Reforestation (Eden Reforestation Projects, 2023). Esta práctica garantiza que el material genético esté adaptado a las condiciones específicas del sitio, como el clima local y las características del suelo, aumentando así la probabilidad de establecimiento y supervivencia de las plántulas, reduciendo el costo de adquisición del material vegetal (Lu et al., 2016).

No obstante, pese a su relevancia, existe una notable carencia de estudios comparativos que evalúen la efectividad de diferentes métodos de propagación bajo las condiciones ambientales del país. Este estudio llena esta brecha específica de conocimiento al generar una evaluación comparativa que determine qué métodos de propagación son más eficientes según las características ambientales locales.

Esta investigación busca optimizar el uso de recursos financieros y humanos, debido a que la restauración frecuentemente enfrenta limitaciones en ambos aspectos (Brancalion et al., 2019). Por esta razón, este análisis no solo contribuirá al conocimiento científico en el ámbito de la restauración ecosistémica mediante la generación de criterios técnicos basados en evidencia local, sino que también maximizará el impacto de las intervenciones mediante el uso eficiente de los recursos disponibles. En última instancia, se busca sentar las bases para estrategias más efectivas y sostenibles

que fortalezcan la resiliencia de los ecosistemas hondureños y promuevan el desarrollo socioeconómico de las comunidades dependientes de estos recursos.

El objetivo general de esta investigación es evaluar la efectividad de cinco métodos de propagación para la restauración de bosques de pino (*Pinus sp.*) y roble (*Quercus sp.*) en la Reserva Forestal Uyuca, Honduras, durante el período 2022-2024, mediante el análisis de la sobrevivencia y desarrollo de especies introducidas, así como la caracterización de la recuperación ecosistémica integral. Para lograrlo se establecieron tres objetivos específicos: i) evaluar las tasas de sobrevivencia de plántulas entre los cinco métodos de propagación (siembra directa, bolas de semilla, trasplante silvestre a raíz desnuda, vivero a raíz desnuda y planta en bolsa) durante los primeros tres años de establecimiento; ii) evaluar el desarrollo morfológico de las plántulas mediante indicadores de crecimiento (altura y diámetro basal) y parámetros de calidad (arquitectura del tallo y estado fitosanitario) según el método de propagación durante los primeros años de crecimiento; y iii) caracterizar la biomasa del estrato herbáceo y la regeneración natural como indicadores de recuperación ecosistémica asociados a cada método de propagación implementado en los sitios de restauración.

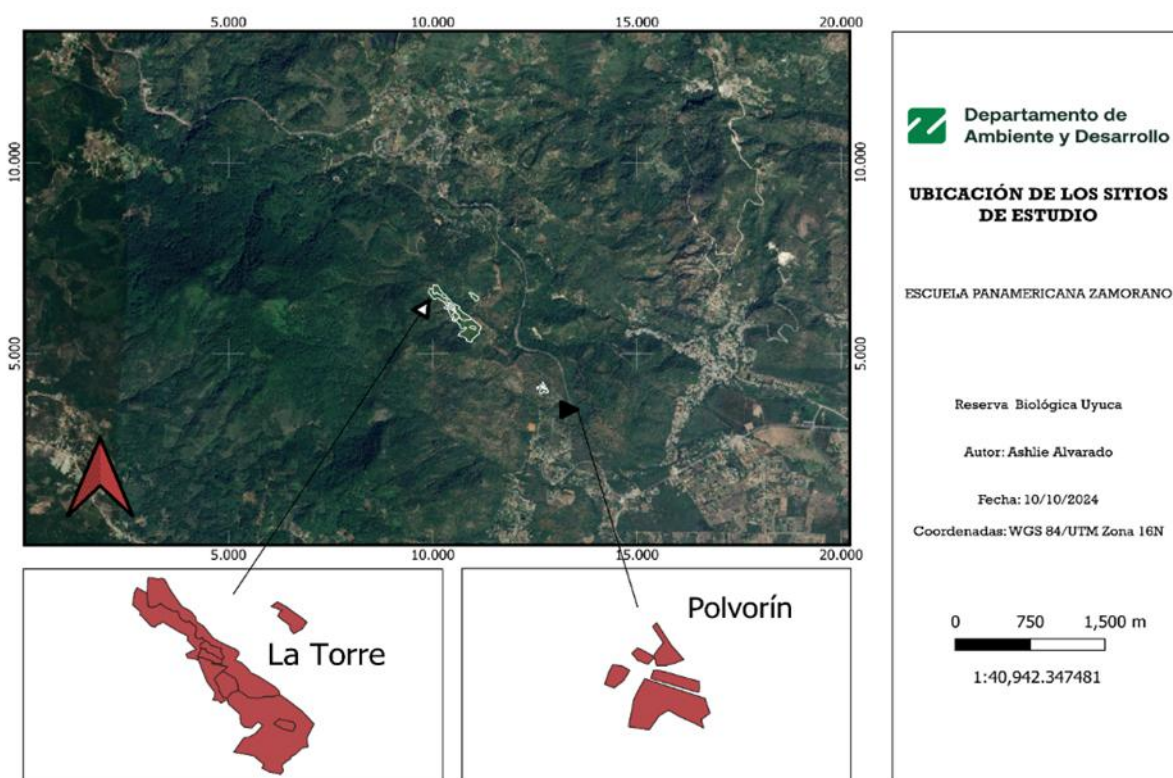
## Metodología

### Ubicación y Área de Estudio

Los sitios de estudio se encuentran en las coordenadas UTM (“Universal Transversal de Mercator”) 16P 494843E y 1550170N, a 15 km al este de Tegucigalpa, Honduras, con elevaciones que oscilan entre los 1,100 y los 1,200 msnm, configurando un relieve montañoso característico de la región mesoamericana. Se caracteriza por la presencia del ecosistema de bosques de pino-encino y desempeña un importante papel en la conservación de la biodiversidad y la provisión de agua para las comunidades vecinas (Mora y López, 2013). En esta reserva predominan suelos desde franco arcilloso hacia suelos pedregosos con alta proporción de fragmentos rocosos (FAO, 1969). El estudio se realizó en los sitios La Torre y Polvorín, ambos ubicados dentro de los límites territoriales correspondientes a las propiedades de la Universidad Zamorano (Figura 1).

**Figura 1**

*Ubicación geográfica de los sitios de estudio, Uyuca, Honduras*



En estos sitios se implementaron cinco métodos de propagación durante el periodo 2022 y 2024 (Cuadro 1). Ambos sitios corresponden a zonas donde la vegetación original de bosque de pino se perdió por efecto de la plaga del gorgojo de pino (*Dendroctonus frontalis*) (CIPF, 2014), debido a esto, presentan condiciones que permiten evaluar la efectividad de distintas técnicas de restauración en ecosistemas de montaña característicos de la región central de Honduras.

### Cuadro 1

#### *Métodos de propagación y especies arbóreas inducidas en los sitios de estudio*

Sitio	Código	Métodos de propagación	Especie
La Torre	VR	Vivero a raíz desnuda	<i>Quercus sp.</i>
	TS	Trasplante silvestre a raíz desnuda	<i>Pinus sp.</i>
	PB	Planta en bolsa	<i>Pinus sp.</i>
Polvorín	BS	Bolas de semillas	<i>Quercus sp.</i>
	VR	Vivero a raíz desnuda	<i>Pinus sp.</i>
	SD	Siembra directa	<i>Pinus sp. y Quercus sp.</i>

*Nota.* Los códigos y nombres de los métodos fueron asignados por Eden Reforestation Projects.

### Análisis de Suelo

La caracterización edáfica constituye un componente fundamental en la evaluación de proyectos de restauración forestal, ya que las propiedades físicas y químicas del suelo determinan en gran medida el establecimiento, supervivencia y desarrollo de las especies plantadas (Brancalion et al., 2019; Chazdon, 2003). La fertilidad del suelo influye directamente en la capacidad de las plántulas para superar el estrés del trasplante y establecer sistemas radiculares funcionales, aspectos críticos para el éxito de cualquier método de propagación .

En ecosistemas forestales degradados, la evaluación edáfica permite identificar limitaciones nutricionales y físicas que afectan diferencialmente la efectividad de los métodos de propagación. Los parámetros seleccionados para este estudio se relacionan específicamente con la restauración: el pH regula la disponibilidad de nutrientes y actividad microbiana; la materia orgánica controla la retención de agua y nutrientes; el nitrógeno es esencial para el crecimiento inicial; el fósforo es fundamental

para el desarrollo radicular; y los cationes (K, Ca, Mg, Na) determinan la estructura del suelo y el equilibrio nutricional vegetal (Brady y Weil, 2016).

La textura del suelo, por su parte, determina las propiedades de drenaje, aireación y capacidad de retención de agua, factores que pueden influir de manera diferencial en el establecimiento de plántulas según el método de propagación empleado. Por ejemplo, los métodos que involucran siembra directa pueden ser más sensibles a problemas de compactación o drenaje deficiente que aquellos que utilizan plántulas pre-establecidas (S. Grossnickle, 2018).

### ***Recolección de Muestras del Suelo en Campo***

Para cada sitio de muestreo se recolectó una muestra compuesta, la cual se forma al combinar varias submuestras tomadas en distintos puntos de un mismo sitio, con el propósito de capturar la variabilidad espacial del suelo (Sosa, 2012). Para este estudio, se tomaron tres submuestras distribuidas aleatoriamente dentro de cada sitio, procurando cubrir de forma representativa toda el área (Figura 2).

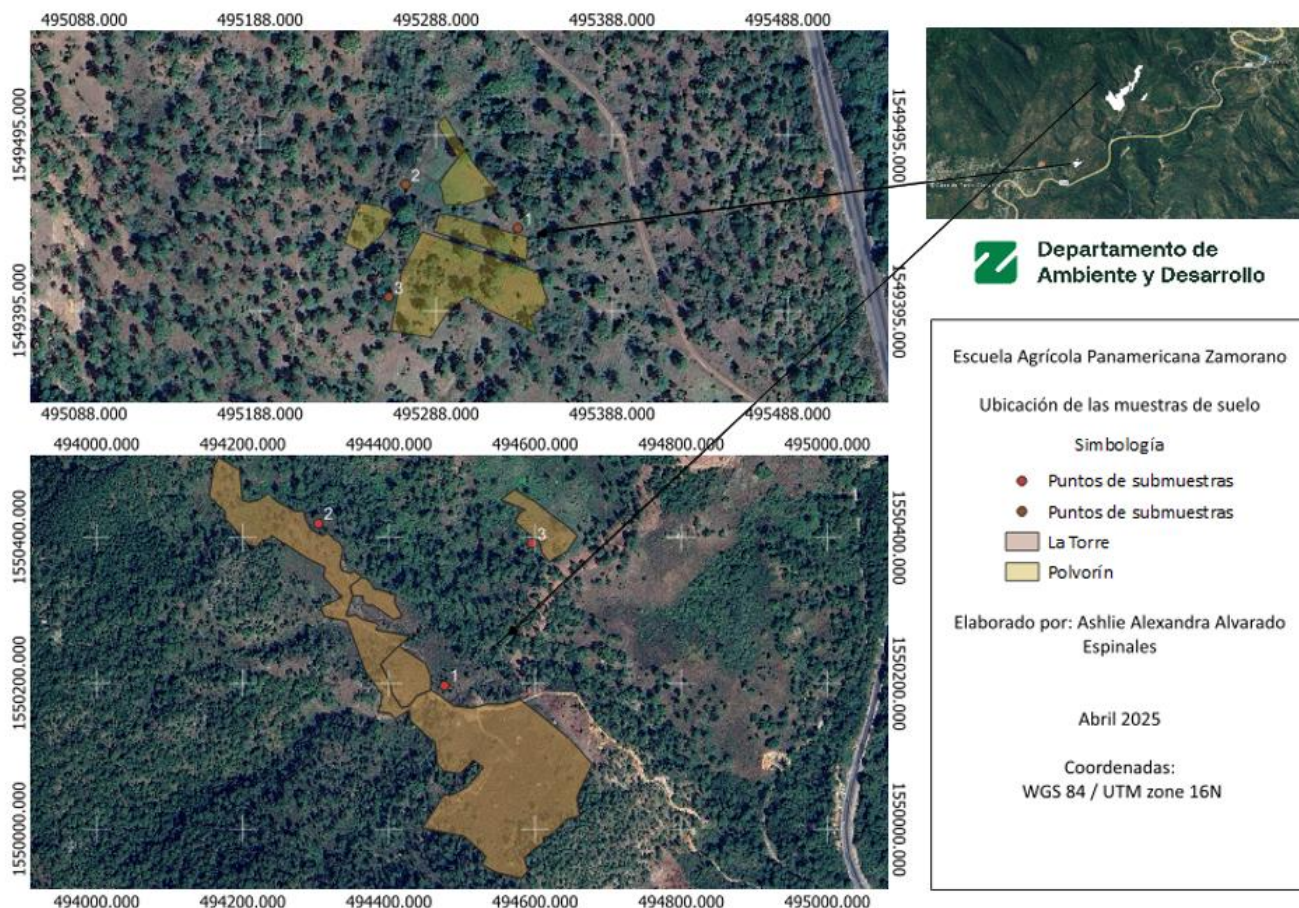
La toma de muestras siguió los lineamientos propuestos por Peña Vanegas (2020). Primero, se retiró toda la hojarasca, gramíneas o vegetación presente en la superficie de un área de 50 cm × 50 cm. Luego, con un palín, se realizó una excavación en forma de "V" a una profundidad de 30 a 40 cm. De las paredes del perfil se tomó una porción de suelo del tamaño del palín. Posteriormente, con un machete limpio, se recortaron los bordes de la muestra y se extrajo aproximadamente 400 g del centro del palín, los cuales se colocaron en un balde. Se repitió el mismo procedimiento por cada submuestra. Una vez recolectadas todas las submuestras, se mezclaron en el balde hasta obtener una muestra compuesta homogénea. De esta mezcla, se separó 1 kg de suelo, que posteriormente fue colocado en una bolsa plástica limpia.

Las muestras fueron adecuadamente conservadas para evitar alteraciones en sus propiedades antes del análisis en laboratorio. Se almacenaron en bolsas plásticas selladas y etiquetadas con información relevante como área, profundidad y fecha de recolección. Durante el transporte, se

mantuvieron a temperatura ambiente y protegidas de la luz solar directa, siguiendo buenas prácticas para minimizar la pérdida de humedad y posibles cambios en las características químicas del suelo (Anexo A).

**Figura 2**

*Ubicación de los puntos de recolección de submuestras para el análisis de suelo*



**Análisis de las Muestras en Laboratorio**

Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de Zamorano, aplicando protocolos estándar establecidos por la institución (Aguilera et al., 2022). El análisis incluyó la determinación de textura mediante el método de Bouyoucos, pH en agua con una relación suelo: agua de 1:1 conforme al método AOAC 994.16, materia orgánica por el método de Walkley & Black para suelos minerales no salinos, y una estimación del nitrógeno total considerando un 5% del contenido de materia orgánica. El fósforo disponible se determinó por colorimetría tras extracción con la

solución Mehlich 3, mientras que las bases intercambiables (K, Ca, Mg, Na) se extrajeron con el mismo método y se cuantificaron por espectrofotometría de absorción atómica. La acidez intercambiable (AI) fue estimada a partir de los valores de pH. Esta caracterización edáfica permitió interpretar las diferencias observadas en el desempeño de los métodos de propagación en el contexto de las condiciones específicas del sitio de estudio.

### **Diseño del Muestreo de Plántulas**

El muestreo en campo aplicado para esta investigación corresponde a un diseño anidado que permite evaluar simultáneamente múltiples aspectos de los métodos de propagación forestal en un marco experimental integrado (Lin et al., 2020). La estructura se fundamenta en el establecimiento de ocho polígonos de propagación distribuidos en los dos sitios de estudio (Cuadro 1). Dentro de cada polígono de restauración se establecieron aleatoriamente tres parcelas principales de muestro con dimensiones de 25 m<sup>2</sup> (5 m × 5 m) como unidades de réplica. En total se establecieron 24 parcelas principales distribuidas en ambos sitios de estudio (Anexo C). La delimitación de estas parcelas se realizó mediante un procedimiento estandarizado que consistió en trazar una línea base orientada hacia el norte y posteriormente ubicar los vértices restantes aplicando el método geométrico 3-4-5, mediante el uso de una cinta métrica para garantizar la perpendicularidad de los ángulos (Pramanik et al., 2020).

### **Evaluación de la Tasa de Supervivencia**

Para la evaluación de la tasa de supervivencia, se utilizaron las 24 parcelas principales de 25 m<sup>2</sup>. En cada parcela se realizó el conteo total de individuos vivos y se registraron las distancias entre plantas y entre hileras utilizando cinta métrica.

Para obtener la supervivencia fue necesario estimar la densidad de siembra inicial. Para ello, se consideraron los marcos de plantación utilizados para el establecimiento de las plántulas: el pino (*Pinus sp.*) fue establecido a una distancia de 1.5 m × 1.5 m, mientras que el roble (*Quercus sp.*) a una

distancia de 1 m × 1 m. La densidad de siembra se calculó mediante la Ecuación 1 propuesta por Esquivel (2019).

$$\text{Densidad de siembra} = \frac{\text{Área total de la parcela (m}^2\text{)}}{\text{Distancia entre planta (m)} \times \text{Distancia entre hilera (m)}} \quad [1]$$

Una vez obtenida la densidad inicial de siembra, que representa el número total de plántulas que debieron establecerse inicialmente, se aplicó la Ecuación 2 adaptada de Mata Balderas et al. (2010) para determinar el porcentaje de sobrevivencia.

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n ai}{\sum_{i=1}^n mi} \times 100 \quad [2]$$

Donde:

$S$  = Sobrevivencia (%)

$\Sigma$  = Sumatoria de los datos de acuerdo con la variable  $a$  o  $m$

$ai$  = Número de plantas vivas en el sitio de muestreo

$mi$  = Número total de plantas establecidas

### **Evaluación del Desarrollo Morfológico y Parámetros de Calidad de las Plántulas**

Para la evaluación del desarrollo morfológico y los parámetros de calidad de las plántulas, se implementó un sistema de muestreo estratificado anidado que utiliza las mismas 24 parcelas principales de 25 m<sup>2</sup> del diseño experimental base.

#### **Toma de Datos de Diámetro y Altura**

En cada parcela principal (25 m<sup>2</sup>) se registró medidas de diámetro basal y altura total en la totalidad de las plantas de pino (*Pinus sp.*), roble (*Quercus sp.*) utilizando pie de rey y cinta métrica, respectivamente. Los datos se registraron utilizando un formato estandarizado para su recolección (Anexo D).

### ***Parámetros de Calidad***

La calidad de las plántulas forestales se define como la capacidad de una plántula para sobrevivir y establecerse exitosamente en campo, siendo un factor importante para el éxito de los programas de restauración forestal. La evaluación de la calidad involucra múltiples atributos morfológicos y fisiológicos que reflejan el potencial de sobrevivencia y crecimiento de las plantas en condiciones de campo (S. Grossnickle, 2012). Para la presente investigación, la evaluación de la calidad de las plántulas se realizó mediante la aplicación de tres parámetros estandarizados, utilizando una escala ordinal de valoración de 1 a 3 puntos, donde el valor 3 representa la condición óptima y el valor 1 indica condiciones deficientes (Cuadro 2).

El primer parámetro corresponde a la arquitectura del tallo, evaluada como indicador de la capacidad estructural de la plántula para mantener estabilidad mecánica y resistir condiciones ambientales adversas como vientos, precipitaciones intensas y variaciones térmicas (S. Grossnickle, 2018). Este atributo permite determinar la solidez del sistema de soporte y la probabilidad de supervivencia durante el proceso de establecimiento inicial.

El segundo parámetro analizado fue el estado fitosanitario, considerando que la ausencia de enfermedades, plagas o daños físicos constituye un requisito fundamental para asegurar un establecimiento exitoso en campo y prevenir la propagación de patógenos hacia los ecosistemas receptores durante los procesos de restauración (Mataruga et al., 2023). Este criterio evalúa la integridad biológica y la ausencia de factores limitantes de origen biótico.

El tercer parámetro correspondió al vigor vegetativo, evaluado como reflejo del estado fisiológico general y la capacidad fotosintética de la planta. Este atributo se cuantificó mediante la observación de la coloración foliar y la densidad del follaje, indicadores directos de la actividad metabólica y el estado nutricional de las plántulas (Navarro et al., 2015).

## Cuadro 2

### *Escala de evaluación de atributos de calidad de plántulas forestales*

Indicador	Valor 1	Valor 2	Valor 3
Arquitectura del tallo	Tallo severamente curvado o quebrado	Ligera desviación de la verticalidad	Tallo completamente erecto y estructuralmente estable
Estado fitosanitario	Síntomas severos	Síntomas leves o moderados	Sin síntomas visibles de problemas fitosanitarios
Vigor vegetativo	Clorosis severa y follaje muy escaso	Coloración foliar verde pálido y densidad foliar intermedia	Coloración verde intensa y follaje denso y uniforme

## Caracterización de Biomasa del Estrato Herbáceo y Regeneración Natural

### ***Biomasa del Estrato Herbáceo***

La biomasa del estrato herbáceo representa un indicador crítico del funcionamiento ecosistémico en procesos de restauración forestal. Según Chazdon (2008), este componente desempeña funciones fundamentales en la protección del suelo, el retorno de nutrientes y la modificación del microclima, factores determinantes para el éxito del establecimiento de especies forestales y la recuperación funcional del ecosistema.

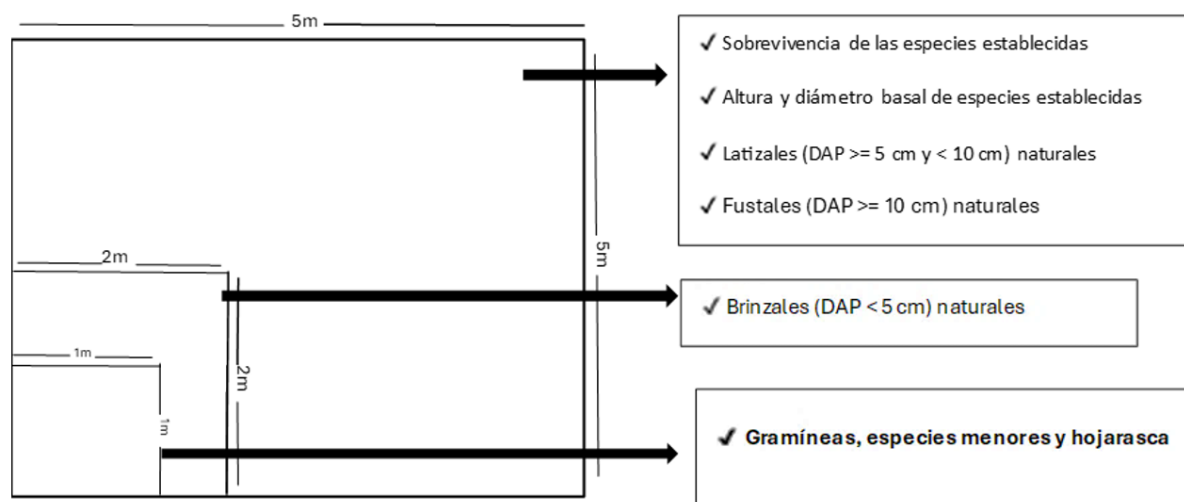
#### **Diseño de Muestreo.**

A partir de cada parcela principal de 25 m<sup>2</sup>, se realizó una delimitación interna de 2 m × 2 m (4 m<sup>2</sup>) que constituye una subparcela específica para el muestreo de regeneración natural. Esta reducción de escala permite concentrar el conteo detallado de brinzales sin intervenir toda la superficie principal, facilitando el registro de datos precisos en un área representativa del estrato de regeneración.

Seguidamente, dentro de esta subparcela de 2 m × 2 m, se delimitó una subparcela de 1 m × 1 m (1 m<sup>2</sup>) para la evaluación de la biomasa del estrato herbáceo, incluyendo gramíneas, herbáceas menores y hojarasca (Figura 3). Esta reducción adicional se justifica por la necesidad de aplicar técnicas destructivas para la recolección de biomasa, lo cual requiere limitar el impacto ecológico y mantener la representatividad del sitio sin afectar las especies leñosas o la regeneración.

**Figura 3**

*Diseño de parcelas principales y subparcelas para evaluación de plántulas, biomasa herbácea y regeneración natural*



#### **Procedimiento de Campo para la Recolección del Material Vegetal**

Una vez delimitada la subparcela de 1 m<sup>2</sup>, se procedió a la extracción total de la biomasa aérea viva del estrato herbáceo. Utilizando un machete y azadón previamente desinfectados, se cortaron cuidadosamente todas las gramíneas y herbáceas menores presentes dentro del área delimitada, cortando a nivel del suelo para asegurar la recolección completa de la biomasa. Durante este proceso se evitó extraer material de especies leñosas (brinzales) o material ajeno al estrato herbáceo objetivo. Todo el material vegetal recolectado fue depositado inmediatamente en sacos de polietileno resistentes, debidamente rotulados con el código de identificación de la parcela, fecha de muestreo y coordenadas GPS (Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés) correspondientes para asegurar la trazabilidad de las muestras.

Posteriormente, los sacos fueron trasladados a la Unidad Forestal donde se registró el peso fresco total de cada muestra utilizando una balanza industrial con precisión de  $\pm 0.1$  g. Para facilitar el manejo posterior y asegurar la homogeneidad del material, la biomasa fue procesada mediante una chipeadora industrial.

### **Procedimiento de Laboratorio.**

El material triturado se transportó al Laboratorio de Bioenergía del Departamento de Ambiente y Desarrollo de Zamorano. Siguiendo el protocolo estándar para determinación de humedad en biomasa vegetal (ASTM International, 2019), cada muestra fue dividida aleatoriamente en tres submuestras representativas de aproximadamente 50 g cada una. Las submuestras se colocaron en bandejas de aluminio previamente taradas y etiquetadas con códigos únicos.

Cada bandeja se colocó en horno de convección forzada a  $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 48 horas hasta alcanzar peso constante (variación  $< 0.1\%$  entre pesadas consecutivas con intervalo de 2 horas), asegurando la deshidratación completa del material vegetal (Pérez Almario et al., 2022). Al finalizar cada ciclo de secado, se registró el peso seco final de cada submuestra.

### ***Determinación de Biomasa Seca***

La determinación de la biomasa seca se realizó mediante el uso de diversas ecuaciones. Este protocolo siguió las recomendaciones establecidas por Hairiah (2011) para la medición de biomasa en ecosistemas forestales tropicales, adaptado para condiciones de campo en proyectos de restauración.

En primer lugar, se calculó el porcentaje de sólidos totales (Ecuación 3), utilizando la relación entre el peso seco, peso húmedo y el peso de la bandeja, permitiendo conocer el contenido de materia seca con relación al total de la muestra.

$$\% \text{ Sólidos} = \frac{(\text{Peso seco+bandeja})-\text{bandeja}}{(\text{Peso de muestra húmeda+bandeja})-\text{bandeja}} \times 100 \quad [3]$$

Posteriormente, se estimó la cantidad de materia seca por unidad de área (Ecuación 4), multiplicando el peso fresco por el porcentaje de materia seca obtenido previamente. Esto proporcionó un valor en gramos por metro cuadrado que refleja la biomasa presente en el área muestreada.

$$\text{Materia seca (g/m}^2\text{)} = \text{Peso fresco (g/m}^2\text{)} \times \frac{\text{Promedio de materia seca (\%)}}{100} \quad [4]$$

Finalmente, se utilizó la Ecuación 5 para convertir estos valores a biomasa expresada en toneladas por hectárea. Esta conversión se realizó a partir del valor de materia seca por metro cuadrado, facilitando así la extrapolación de los datos a una escala mayor y más útil para la planificación y evaluación de restauración ecológica.

$$\text{Biomasa (ton/ha)} = \frac{\text{Materia seca (g/m}^2\text{)} \times 10}{1000} \quad [5]$$

### ***Regeneración Natural***

Para evaluar la regeneración natural del ecosistema, se implementó un diseño de muestreo estratificado que permitió capturar los distintos estratos de la vegetación forestal (Anexo E). Dentro de cada parcela principal de 25 m<sup>2</sup> se realizó el conteo total de individuos naturales clasificados en tres categorías diamétricas: fustales (individuos con DAP ≥ 10 cm), que representan los individuos reproductivamente maduros que contribuyen significativamente a la biomasa del bosque; latizales (individuos con DAP entre 5 y 10 cm), correspondientes a individuos juveniles en fase de crecimiento intermedio; y brinzales (individuos con DAP < 5 cm), que representan la regeneración natural en fase juvenil temprana.

Para el registro de brinzales, se estableció una subparcela anidada de 2 m × 2 m (4 m<sup>2</sup>) dentro de cada parcela principal, considerando que este estrato presenta mayor densidad y requiere una unidad de muestreo más pequeña para obtener estimaciones representativas (Figura 3). Esta configuración anidada permitió una evaluación integral de la estructura vertical del bosque, desde el sotobosque hasta el dosel principal, facilitando el análisis comparativo de la efectividad de los métodos de propagación en todos los estratos de la vegetación (Casanoves et al., 2017).

Para la extrapolación a densidad de plantas por hectárea, se aplicaron los siguientes factores de conversión: 400 para fustales y latizales registrados en la parcela de 25 m<sup>2</sup>, y 2,500 para brinzales

contabilizados en la subparcela de 4 m<sup>2</sup>. Estos factores se calcularon mediante la relación: Factor = 10,000 m<sup>2</sup> (1 ha) / área de la parcela (m<sup>2</sup>).

### **Análisis de Datos**

Todos los datos recolectados se organizaron inicialmente en hojas de cálculo mediante Microsoft Excel. A continuación, se evaluó la normalidad de las variables de supervivencia, altura y diámetro basal para *Pinus sp.* y *Quercus sp.* empleando la prueba de Shapiro–Wilk. La hipótesis nula asumió que los datos seguían una distribución normal, frente a la hipótesis alternativa de una distribución diferente, con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

Para aquellas variables que cumplían los supuestos de normalidad (y homogeneidad de varianzas), se llevó a cabo un análisis de varianza unidireccional (ANOVA) al mismo nivel de significancia ( $p \leq 0.05$ ) con el fin de determinar si existían diferencias significativas entre los métodos de propagación. Cuando el ANOVA arrojó resultados significativos, se aplicó la prueba de Tukey para identificar específicamente qué pares de tratamientos diferían entre sí. En los casos en que los datos no cumplían los supuestos paramétricos, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis para comparar las medianas de los distintos métodos de propagación.

Por otro lado, el proceso de análisis de los datos obtenidos para la evaluación de los parámetros de calidad se fundamentó en el cálculo de la frecuencia relativa para cada uno de los valores asignados (1, 2 y 3) en los tres parámetros evaluados. Una vez completada la valoración individual de cada plántula según la escala ordinal establecida, se procedió a contabilizar el número total de plántulas que obtuvieron cada puntuación específica dentro de cada indicador de calidad. La frecuencia relativa se calculó dividiendo el número de plántulas que recibieron una puntuación determinada entre el número total de plántulas evaluadas para cada grupo, expresándolo en porcentaje, permitiendo una interpretación más clara de la distribución de la calidad en la población de plántulas analizadas.

Todos los análisis estadísticos se ejecutaron en “Software SAS® OnDemand for Academics” (Sistema de Análisis Estadístico), mientras que la presentación gráfica de los resultados (gráficas de barras y diagrama de caja) se elaboró en “Microsoft Excel®”.

## Resultados y Discusión

### Evaluación de la Tasa de Supervivencia de Plántulas

Se evaluaron las tasas de supervivencia de los cinco métodos de propagación implementados en ambos sitios de estudio, evidenciando diferencias tanto entre métodos como entre sitios (Figura 4). En el sitio “La Torre”, las plántulas de pino (*Pinus sp.*) establecidas mediante el método de planta en bolsa (PB) alcanzaron la mayor tasa de supervivencia con un 51% a los 6 meses de establecimiento. Este resultado es consistente con los hallazgos de Sigala Rodríguez et al. (2018), quienes reportaron tasas de supervivencia de 63.8% en plantas de *Pinus pseudostrabus* acondicionadas en bolsas de polietileno durante 2 años previo a su establecimiento. La diferencia del 12.8% puede atribuirse a factores como la especie específica utilizada, las condiciones microclimáticas del sitio y el tiempo de acondicionamiento de las plántulas antes del trasplante.

Los métodos restantes en La Torre mostraron tasas de supervivencia considerablemente menores: el trasplante de *Pinus sp.* silvestre a raíz desnuda (TS) reflejó una supervivencia de apenas 6%. Estos resultados coinciden con los reportados por Monzón López (2020) quienes encontraron que las plántulas producidas en contenedores mostraron tasas de supervivencia superiores comparadas con las de raíz desnuda.

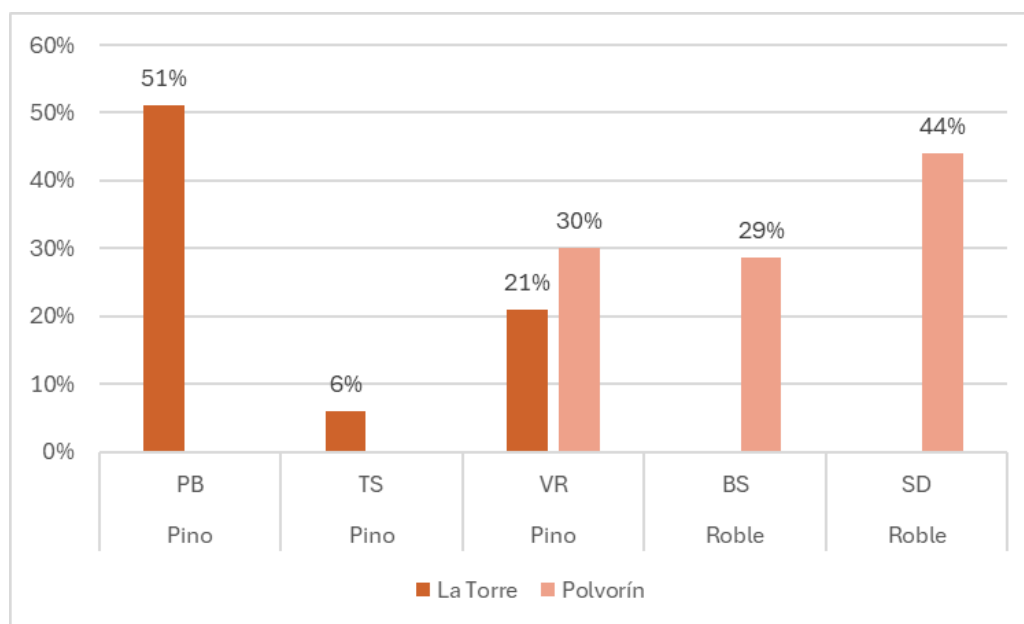
En Polvorín, la siembra directa (SD) de roble (*Quercus sp.*) registró una tasa de supervivencia del 44% a los 30 meses de establecimiento. Este resultado es comparable con los reportados por Gutiérrez y Navarrate (2021) en condiciones similares, validando la efectividad de este método para especies del género *Quercus*. Los métodos de bolas de semilla (BS) y vivero a raíz desnuda (VR) para roble mostraron supervivencias de 29 y 30% respectivamente, valores que, aunque menores, siguen siendo aceptables para proyectos de restauración forestal.

Las diferencias observadas en las tasas de supervivencia reflejan la interacción compleja entre el método de propagación, las características de las especies y las condiciones ambientales específicas de cada sitio. Según Muñoz Flores et al. (2013) las plántulas cultivadas en contenedores mantienen

una mayor integridad del sistema radicular durante el trasplante, lo que explica las superiores tasas de supervivencia observadas en el método de planta en bolsa comparado con los métodos de raíz desnuda.

**Figura 4**

*Tasa de supervivencia por sitio, método de propagación y especie*



*Nota.* BS=bolas de semillas, SD=siembra directa, VR=vivero a raíz desnuda, TS=trasplante a raíz desnuda, PB=planta en bolsa.

La variabilidad entre especies también es notable. Las altas tasas de supervivencia en especies de *Quercus* pueden atribuirse al hecho de que las bellotas son semillas relativamente grandes, lo que les proporciona mayores reservas energéticas para superar las condiciones adversas durante el establecimiento inicial (Bartlow et al., 2018). En contraste, las especies de *Pinus sp.*, aunque pioneras por naturaleza, mostraron mayor sensibilidad al método de propagación empleado.

Los valores obtenidos contrastan con estudios de seguimiento a largo plazo, como el de Gutiérrez (2020), quien reportó tasas superiores al 90% en plantas con 16 años de establecimiento. Esta diferencia temporal es esperada, ya que las tasas de supervivencia en especies forestales tienden a estabilizarse y aumentar después de los primeros años críticos de establecimiento, una vez superado el estrés inicial del trasplante y establecidas las condiciones radiculares adecuadas.

Las diferencias observadas en las tasas de supervivencia entre sitios están fuertemente influenciadas por las características edáficas específicas de cada localidad. El establecimiento de especies forestales en suelos más arcillosos favorece una mayor capacidad de retención de agua, factor vital para la emergencia y supervivencia de las plántulas en etapas críticas (Bernaola-Paucar et al., 2018). Adicionalmente, S. C. Grossnickle y MacDonald (2018) destacan que las condiciones microclimáticas del sitio, incluyendo la exposición solar y el régimen de precipitaciones, influyen significativamente en el éxito del establecimiento, independientemente del método de propagación utilizado.

Los resultados del análisis de suelo denotan que el sitio El Polvorín presentó una textura franco-arcillosa (44% arena, 28% limo, 28% arcilla) que favorece mejor retención de humedad a diferencia del sitio La Torre, que exhibe una textura franco arcillo arenosa (58% arena, 18% limo, 24% arcilla) con mayor drenaje. Químicamente, Polvorín mostró una capacidad de intercambio catiónico efectiva superior (10.68 vs. 7.62  $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ ) y mayor disponibilidad de calcio (7.51 vs. 4.73  $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ ), factores que favorecen la retención de nutrientes y el establecimiento radicular (Anexo B). Según Torres Rojo (2021) las propiedades físicas del suelo, particularmente la textura y la capacidad de retención de agua, son determinantes críticos para la supervivencia de plántulas forestales durante los primeros años de establecimiento en proyectos de restauración. Estos factores edáficos contribuyen a explicar las mayores tasas de supervivencia observadas en Polvorín para roble mediante siembra directa (44%) comparado con los resultados más variables obtenidos en La Torre.

Estos resultados sugieren que la selección del método de propagación debe considerar tanto las características biológicas de la especie como las condiciones específicas del sitio de restauración, incluyendo las propiedades edáficas que determinan la disponibilidad de agua y nutrientes para la supervivencia inicial de las plántulas.

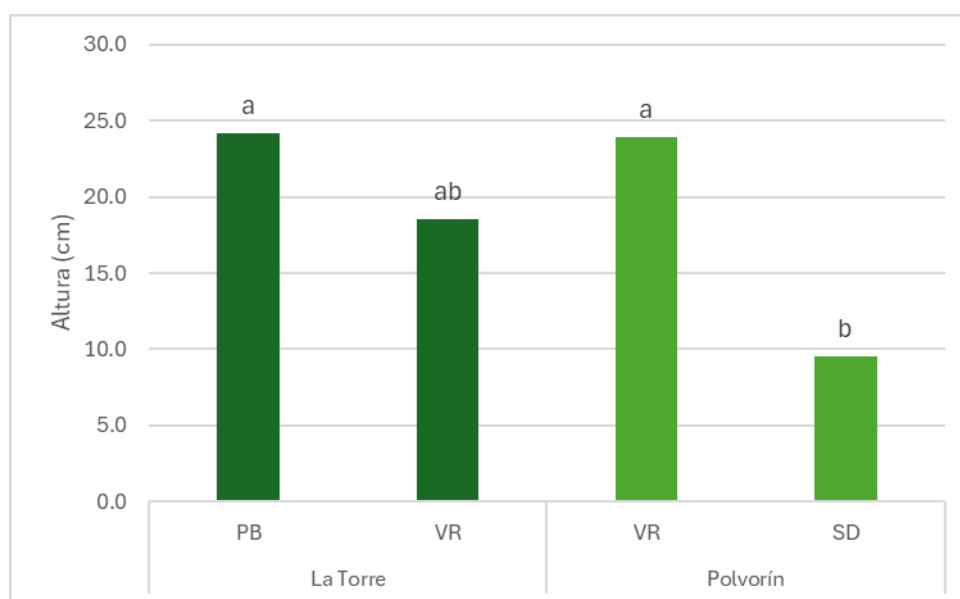
## Evaluación de Desarrollo de Plántulas en Restauración Inducida

### Desarrollo Inicial - *Pinus sp.* (Seis Meses)

El análisis de varianza (ANOVA) reveló diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) en la altura entre los diferentes métodos de propagación evaluados para *Pinus sp.* durante los primeros seis meses de establecimiento. Las plántulas establecidas mediante planta en bolsa (PB) en La Torre alcanzaron una altura promedio de 24.18 cm, mientras que aquellas propagadas por vivero a raíz desnuda (VR) en Polvorín registraron 23.89 cm. Ambos métodos mostraron un desempeño estadísticamente similar, estableciendo un rango superior de desarrollo que refleja las ventajas del cultivo controlado en vivero (Figura 5).

#### Figura 5

Altura promedio de las plántulas de *Pinus sp.* de seis meses según el método de propagación en ambos sitios



Nota. a=valor más alto, b=valor más bajo, ab=no difieren ni de a ni b.

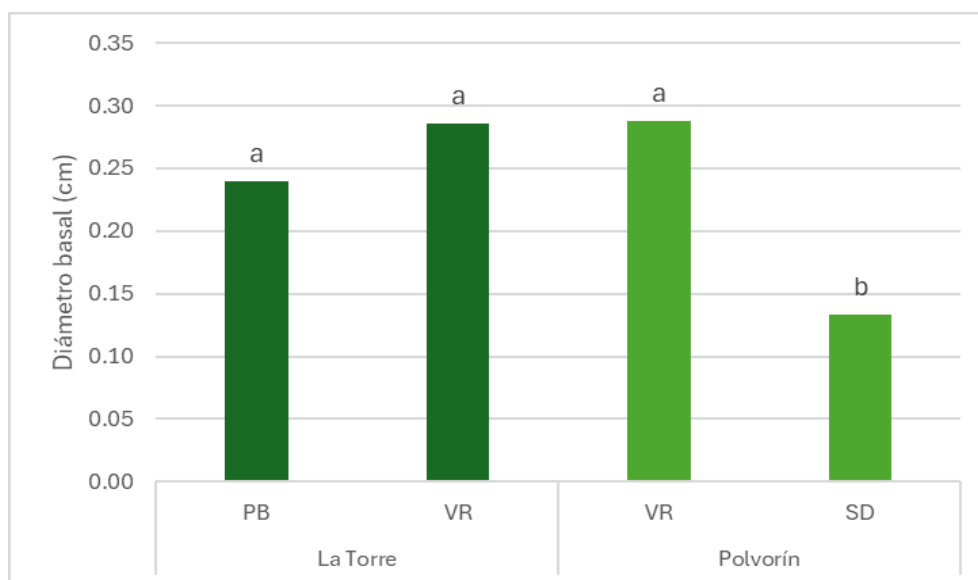
Las plántulas de vivero a raíz desnuda ubicadas en La Torre mostraron un desempeño intermedio con 18.57 cm de altura, evidenciando el efecto diferencial de las condiciones del sitio sobre el mismo método de propagación. Notablemente, el método de siembra directa (SD) en Polvorín

mostró el crecimiento más limitado, con plántulas que alcanzaron únicamente 9.5 cm de altura promedio, siendo estadísticamente inferior a todos los demás tratamientos evaluados.

Los resultados del diámetro basal siguieron un patrón consistente con los datos de altura. Las plántulas de siembra directa registraron los valores más bajos (0.133 cm), mientras que los métodos de vivero y planta en bolsa no presentaron diferencias significativas entre sí, oscilando entre 0.244 y 0.289 cm (Figura 6).

### Figura 6

*Diámetro basal promedio de las plántulas de Pinus sp. de seis meses según el método de propagación y en ambos sitios*



Nota. a=valor más alto, b=valor más bajo, ab=no difieren ni de a ni b.

Estos hallazgos son consistentes con los reportados por S. C. Grossnickle y El-Kassaby (2016), quienes encontraron que las plántulas de coníferas producidas en contenedores o con sistemas radiculares protegidos durante el transporte muestran tasas de crecimiento inicial superiores en 40 - 60% comparadas con métodos de siembra directa. La superioridad de los métodos de vivero puede atribuirse a las condiciones controladas de desarrollo radicular y la reducción del “shock” de trasplante.

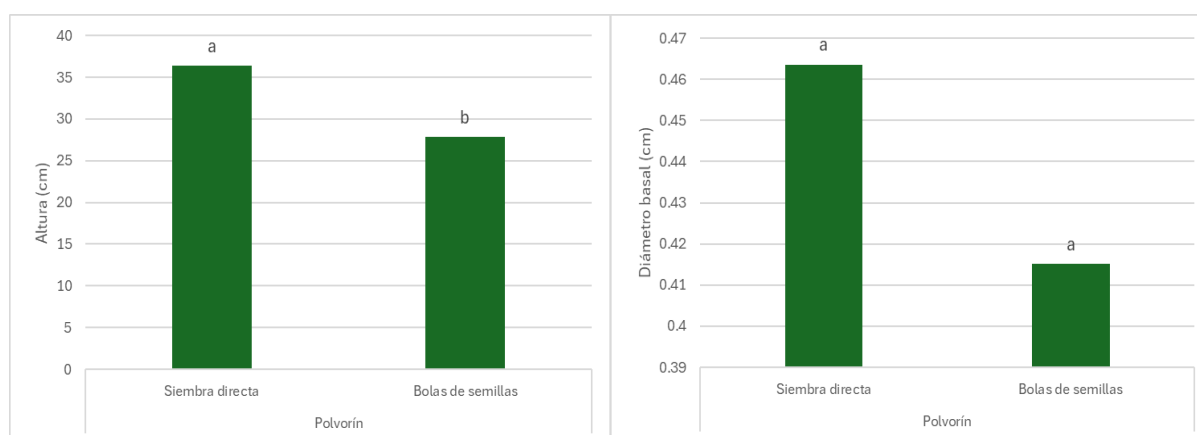
### Desarrollo de plántulas de *Quercus sp.* (Treinta Meses)

La evaluación de plántulas de *Quercus sp.* a los treinta meses reveló un patrón contrastante al observado en *Pinus sp.*, evidenciando respuestas especies-específicas a los métodos de propagación. El análisis de varianza para altura indicó diferencias significativas entre métodos ( $p < 0.05$ ). Las plántulas establecidas mediante siembra directa (SD) alcanzaron una altura promedio de 36.36 cm, superando significativamente a las de bolas de semilla (BS), que registraron 27.85 cm. Esta diferencia de 8.52 cm (23.4% superior) fue confirmada mediante la prueba de Kruskal-Wallis ( $\chi^2 = 9.50$ ,  $p = 0.0020$ ), demostrando estadísticamente que la siembra directa promueve un crecimiento en altura significativamente mayor para *Quercus sp.*

El análisis del diámetro basal mostró una tendencia similar, aunque menos pronunciada. Aunque el ANOVA no detectó diferencias estadísticamente significativas entre métodos, la siembra directa presentó un diámetro medio superior (0.464 cm) comparado con las bolas de semilla (0.415 cm), representando una diferencia del 11.8% (Figura 7).

#### Figura 7

*Diámetro basal y altura promedio de las plántulas de Quercus sp. de 30 meses según el método de propagación y el sitio de establecimiento*



Nota. a=valor más alto, b=valor más bajo, ab=no difieren ni de a ni b.

### **Análisis Comparativo entre Especies**

La comparación interespecífica reveló patrones diferenciados de respuesta a los métodos de propagación. Para *Pinus sp.*, los métodos que involucran desarrollo en vivero (planta en bolsa y vivero a raíz desnuda) resultaron superiores, mientras que, para *Quercus sp.*, la siembra directa mostró la mayor efectividad. Esta diferencia puede explicarse por las características biológicas contrastantes de ambos géneros.

Según Löf et al. (2019) las especies del género *Quercus sp.* poseen semillas de gran tamaño (bellotas) con abundantes reservas nutricionales que facilitan el establecimiento directo en campo, permitiendo superar condiciones adversas durante las etapas iniciales sin requerir acondicionamiento en vivero. En contraste, Bernaola Paucar et al. (2016) reportaron que las coníferas, particularmente *Pinus sp.*, se benefician significativamente del desarrollo radicular controlado en vivero, lo que mejora su capacidad de establecimiento en condiciones de campo.

### **Efecto del Sitio en el Desempeño**

Los resultados evidenciaron interacciones significativas entre método de propagación y sitio. En Polvorín, caracterizado por suelos franco-arcillosos con mayor capacidad de intercambio catiónico ( $10.68 \text{ cmol}_{(+)}/\text{kg}$ ), los métodos de siembra directa mostraron mejor desempeño, particularmente para *Quercus sp.* Esto concuerda con los hallazgos de Rascón et al. (2022), quienes documentaron que suelos con mayor capacidad de retención de agua y nutrientes favorecen el establecimiento directo de especies forestales, reduciendo la dependencia de acondicionamiento previo en vivero. Por el contrario, en La Torre, con suelos franco-arcillo-arenosos y menor capacidad de intercambio catiónico ( $7.62 \text{ cmol}_{(+)}/\text{kg}$ ), los métodos que proporcionan ventajas iniciales mediante desarrollo en vivero (planta en bolsa) mostraron superioridad, compensando las limitaciones edáficas del sitio.

Los resultados sugieren la necesidad de adoptar estrategias especies-específicas y sitio-específicas en proyectos de restauración forestal. Para *Pinus sp.* en sitios con limitaciones edáficas, los métodos de vivero proporcionan ventajas competitivas durante el establecimiento inicial. Para

*Quercus sp.* en sitios con condiciones edáficas favorables, la siembra directa emerge como el método más eficiente, reduciendo costos de producción en vivero mientras maximiza el crecimiento. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar las interacciones método × especie × sitio en el diseño de protocolos de restauración, optimizando tanto la efectividad biológica como la eficiencia económica de las intervenciones.

### ***Evaluación de Parámetros de Calidad de Plántulas***

#### **Arquitectura del Tallo.**

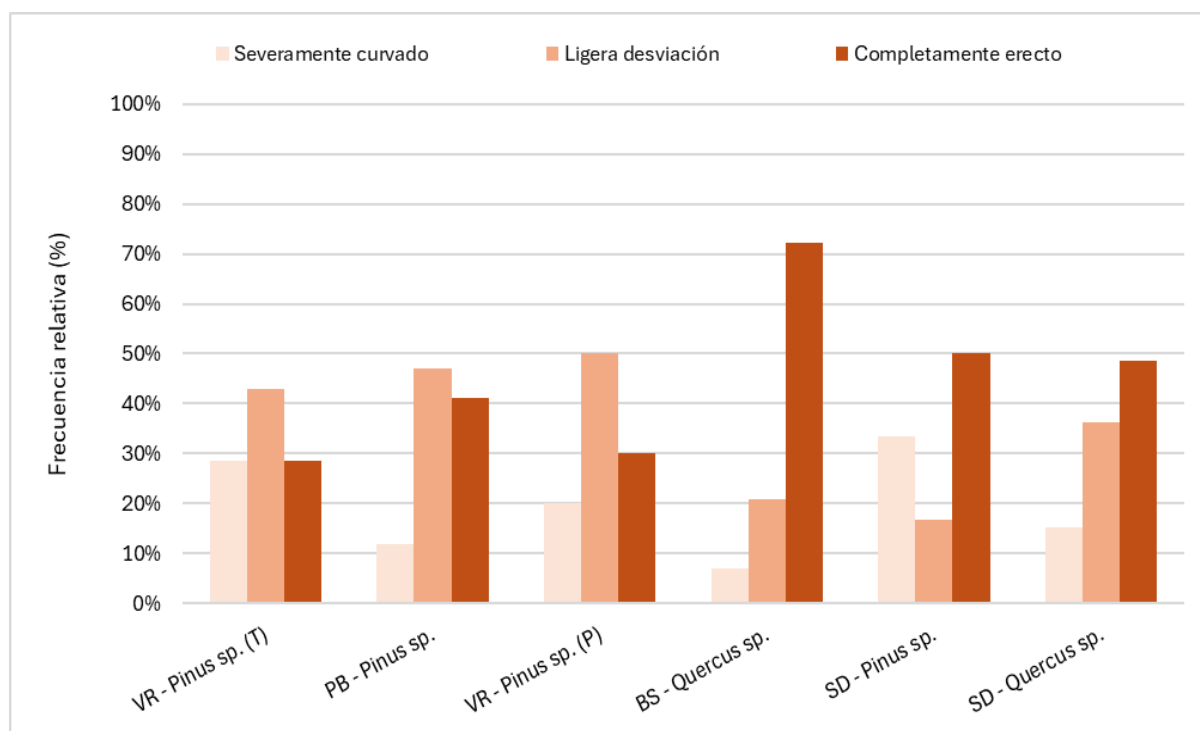
Los resultados de la evaluación de arquitectura del tallo revelaron diferencias notables entre especies y métodos de propagación (Figura 8). El mejor desempeño correspondió al método de bolas de semilla (BS) de *Quercus sp.*, que alcanzó 72% de individuos con tallos completamente erectos (valoración 3) dentro del grupo evaluado. Estos resultados contrastan marcadamente con la propagación de *Pinus sp.* mediante vivero a raíz desnuda (VR) en el sitio La Torre, que mostró el desempeño menos favorable con apenas el 29% de plántulas con tallos completamente erectos y la mayor proporción de individuos en estados intermedios (52%) o críticos de desarrollo estructural (19%).

La superioridad observada en *Quercus sp.* puede atribuirse a las características intrínsecas de la especie y la compatibilidad con el método de bolas de semilla. Según Puttonen (1989), la arquitectura del tallo refleja directamente la capacidad de las plántulas para desarrollar estabilidad mecánica y resistir condiciones ambientales adversas. Las especies con mejor arquitectura del tallo presentan mayor probabilidad de supervivencia a largo plazo y menor susceptibilidad a daños por viento o precipitaciones intensas.

El pobre desempeño de *Pinus sp.* en vivero a raíz desnuda puede estar relacionado con el estrés del trasplante y las condiciones edáficas menos favorables del sitio La Torre. Las coníferas son particularmente sensibles al manejo de raíz desnuda debido a su susceptibilidad a la desecación radicular, lo que puede comprometer el desarrollo estructural inicial.

**Figura 8**

*Frecuencia relativa de las valoraciones correspondientes a la arquitectura del tallo por método de propagación y especie*



Nota. BS=bolas de semillas, SD=siembra directa, VR=vivero a raíz desnuda, TS=trasplante a raíz desnuda, PB=planta en bolsa. T= La Torre, P= Polvorín

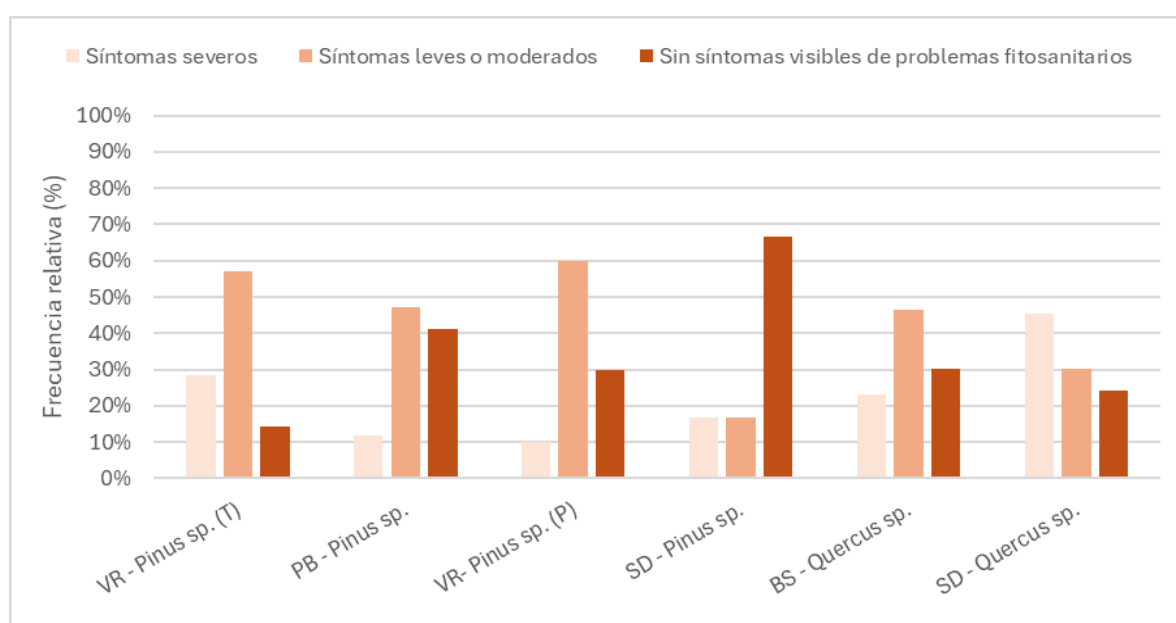
### **Estado Fitosanitario.**

La evaluación del estado sanitario reveló patrones contrastantes entre especies y métodos (Figura 9). La siembra directa de *Pinus sp.* sobresalió como el método con mejor estado fitosanitario, alcanzando un 67% de individuos sin síntomas visibles de problemas fitosanitarios (valoración 3) y manteniendo bajos porcentajes de síntomas leves (22%) y severos (11%). En contraste, la siembra directa de *Quercus sp.* presentó un patrón inverso, con mayor porcentaje de plántulas con síntomas severos (35%) y leves (40%) que individuos completamente sanos (25%). Este resultado sugiere mayor susceptibilidad de *Quercus sp.* a patógenos o estrés abiótico en las condiciones específicas del sitio Polvorín.

Las diferencias observadas en estado fitosanitario reflejan tanto la susceptibilidad especies-específica como la influencia de las condiciones ambientales del sitio. Según Duryea (1985) el estado fitosanitario constituye un predictor crítico del éxito de establecimiento, ya que plántulas con problemas sanitarios presentan menor capacidad de competencia y mayor mortalidad.

**Figura 9**

*Frecuencia relativa de las valoraciones correspondientes al estado fitosanitario por método de propagación y especie*



Nota. BS=bolas de semillas, SD=siembra directa, VR=vivero a raíz desnuda, TS=trasplante a raíz desnuda, PB=planta en bolsa. T= La Torre, P= Polvorín

La superioridad de *Pinus sp.* en siembra directa puede estar relacionada con su naturaleza pionera y mayor tolerancia a condiciones edáficas variables. Jacobs et al. (2005) reportaron que las coníferas establecidas mediante siembra directa desarrollan mayor resistencia a patógenos del suelo al establecer asociaciones micorrízicas tempranas, lo que explicaría los mejores resultados fitosanitarios observados. Por el contrario, la mayor incidencia de problemas fitosanitarios en *Quercus sp.* puede estar asociada con el mayor contenido de humedad del suelo franco-arcilloso de Polvorín, que favorece el desarrollo de patógenos fúngicos, particularmente durante las etapas iniciales de

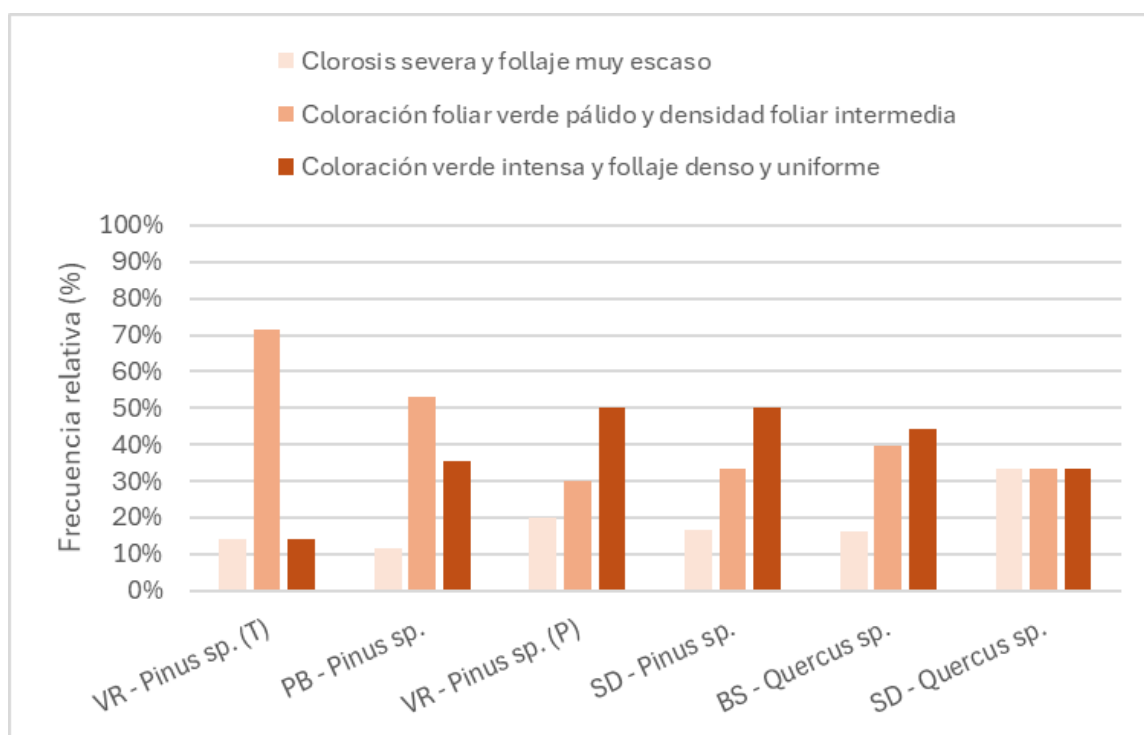
establecimiento cuando las defensas naturales de las plántulas aún no están completamente desarrolladas.

### Vigor Vegetativo.

La evaluación del vigor vegetativo mostró variaciones significativas entre especies y métodos de propagación (Figura 10). El método de bolas de semilla de *Quercus sp.* presentó un desempeño sólido con buenos porcentajes de individuos en las categorías de mejor valoración, mostrando coloración verde intensa y follaje denso y uniforme.

**Figura 10**

*Frecuencia relativa de las valoraciones correspondientes a vigor vegetativo por método de propagación y especie*



Nota. BS=bolas de semillas, SD=siembra directa, VR=vivero a raíz desnuda, TS=trasplante a raíz desnuda, PB=planta en bolsa. T= La Torre, P= Polvorín

El método de vivero a raíz desnuda (VR) de *Pinus sp.* en La Torre presentó el desempeño más deficiente, con apenas 14% de individuos en la categoría de mejor valoración, mientras que el 71% de los especímenes evaluados mostraron características de coloración foliar verde pálido y densidad

foliar intermedia (valoración 2), indicando estrés nutricional o hídrico. El vigor vegetativo refleja el estado fisiológico general y la capacidad fotosintética de las plántulas, constituyendo un indicador integral de la adaptación al sitio. Según Ritchie (1984), las plantas con mayor vigor vegetativo presentan mayor capacidad de crecimiento y mejor respuesta a condiciones ambientales variables.

El buen desempeño de *Quercus sp.* mediante bolas de semilla puede atribuirse a las características de las bellotas, que proporcionan reservas nutricionales abundantes durante las etapas iniciales de desarrollo. El bajo vigor observado en *Pinus sp.* mediante vivero a raíz desnuda en La Torre sugiere incompatibilidad entre el método de propagación y las condiciones edáficas del sitio. Las limitaciones en capacidad de intercambio catiónico ( $7.62 \text{ cmol}_{(+)}/\text{kg}$ ) y el mayor contenido de arena (58%) pueden estar limitando la disponibilidad de nutrientes y agua, factores críticos para el mantenimiento del vigor vegetativo durante las etapas iniciales de establecimiento.

#### **Integración de Parámetros de Calidad.**

Los resultados integrados de los tres parámetros de calidad establecen un patrón consistente que posiciona al método de bolas de semilla para *Quercus sp.* como la opción más exitosa en términos de calidad general de plántulas entre las especies nativas evaluadas. Este método mostró excelente arquitectura del tallo (72% valoración máxima) y desempeño aceptable en los demás parámetros evaluados. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para el diseño de protocolos de restauración con especies nativas, sugiriendo la necesidad de seleccionar métodos de propagación específicos según la especie objetivo y las condiciones particulares del sitio de intervención.

#### **Caracterización de Biomasa del Estrato Herbáceo y Regeneración Natural**

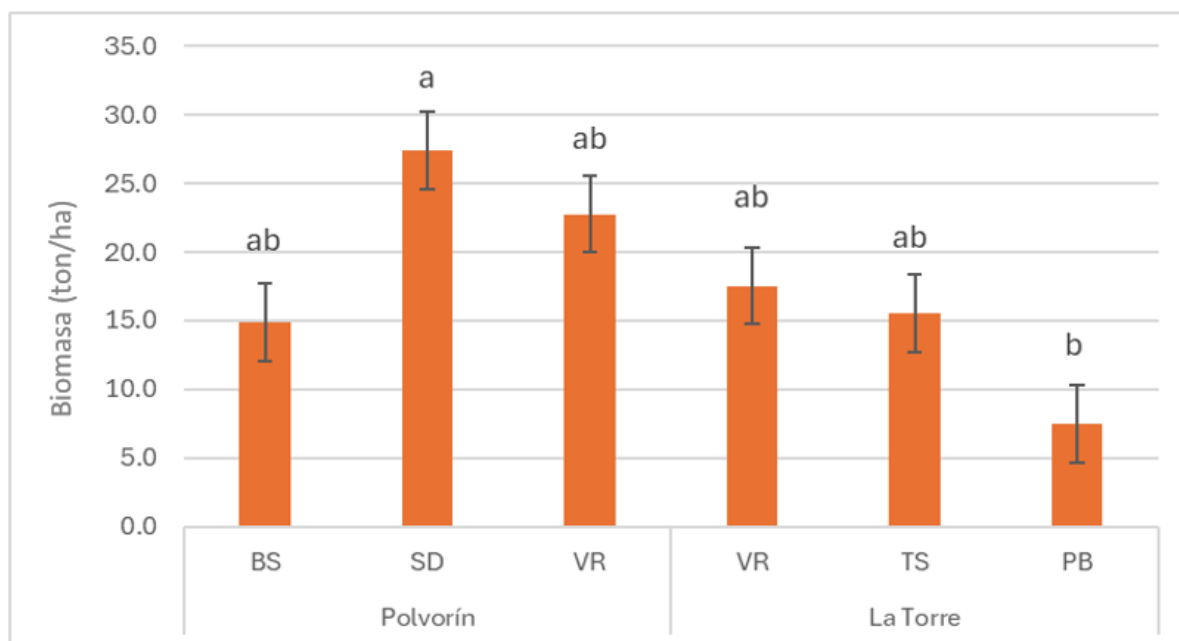
##### ***Biomasa del Estrato Herbáceo***

El ANOVA reveló que el método de propagación influye significativamente ( $p < 0.05$ ) en la acumulación de biomasa del estrato herbáceo, componente crítico del sotobosque que incluye gramíneas, herbáceas menores y hojarasca. Los resultados mostraron que las áreas restauradas mediante siembra directa (SD) favorecieron la mayor acumulación de biomasa herbácea, registrando

27.40 ton/ha en el sitio Polvorín, mientras que las parcelas con planta en bolsa (PB) presentaron la menor biomasa del estrato herbáceo, con solo 7.47 ton/ha en La Torre (Figura 11).

**Figura 11**

*Presencia de biomasa (ton/ha) por método de propagación y sitio de establecimiento*



*Nota.* a=valor más alto, b=valor más bajo, ab=no difieren ni de a ni b. BS=bolas de semillas, SD=siembra directa, VR=vivero a raíz desnuda, TS=trasplante a raíz desnuda, PB=planta en bolsa.

Los métodos intermedios como vivero a raíz desnuda (VR) con 17.54 ton/ha en La Torre y 22.78 ton/ha en Polvorín, trasplante silvestre a raíz desnuda (TS) con 15.56 ton/ha, y bolas de semillas (BS) con 14.91 ton/ha; no mostraron diferencias significativas con los valores extremos al 5% de significancia, estableciendo un rango intermedio de desarrollo del estrato herbáceo.

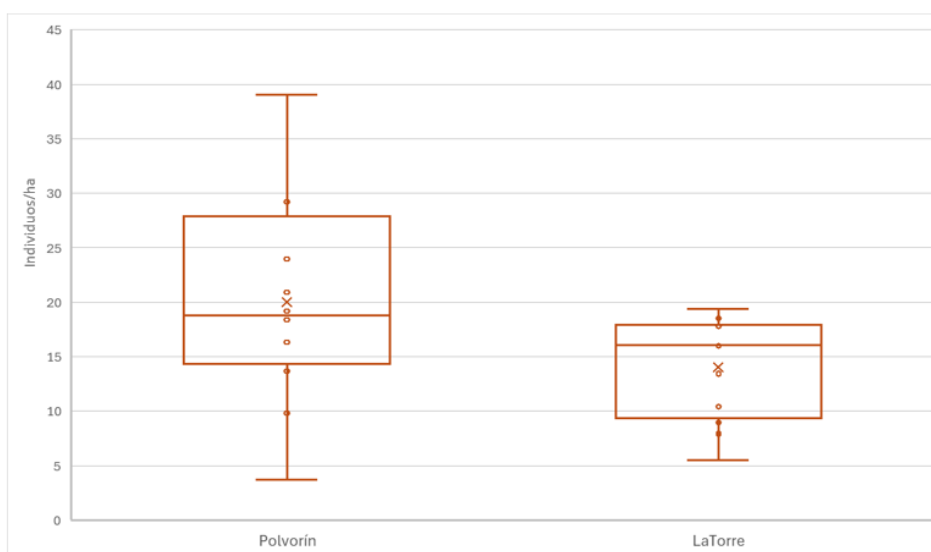
La mayor acumulación de biomasa herbácea observada en parcelas de siembra directa puede atribuirse a la menor competencia inicial ejercida por las especies arbóreas establecidas, permitiendo mayor desarrollo del sotobosque durante las etapas tempranas de la restauración. Según Chazdon (2008), la biomasa del estrato herbáceo constituye un indicador temprano de la recuperación funcional del ecosistema, reflejando el restablecimiento de procesos importantes como el retorno de nutrientes y la protección del suelo.

Por el contrario, la menor biomasa herbácea en parcelas con planta en bolsa sugiere mayor competencia por recursos debido al establecimiento más vigoroso de las especies arbóreas principales. Poorter et al. (2021) documentaron que el desarrollo de la vegetación del sotobosque está inversamente relacionado con la densidad y vigor del dosel superior, particularmente en las etapas iniciales de restauración forestal.

Como se muestra en la Figura 12, las diferencias entre sitios refuerzan la importancia de las condiciones edáficas en la recuperación ecosistémica. Polvorín, con su suelo franco-arcilloso (pH 5.97, CICE 10.68  $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ ), favoreció mayor acumulación de biomasa herbácea comparado con La Torre, caracterizado por suelo franco-arcillo-arenoso (58% arena, pH 5.53, CICE 7.62  $\text{cmol}_{(+)}/\text{kg}$ ).

**Figura 12**

*Distribución de la producción de biomasa (ton/ha) por sitio de establecimiento*



Crouzeilles et al. (2017) reportaron que suelos con mayor capacidad de retención de agua y nutrientes facilitan la recuperación tanto del dosel como del sotobosque, acelerando los procesos de restauración ecosistémica. Los valores de biomasa herbácea encontrados en este estudio (7.47 a 27.40 ton/ha) se encuentran dentro del rango reportado para ecosistemas forestales templados de la región mesoamericana. Alberto y Elvir (2008) reportaron 8.51 ton/ha de biomasa del estrato herbáceo en plantaciones de *Pinus tecunumanii* de aproximadamente 5 años en Perú, mientras que estudios en

bosques de pino del sur de Estados Unidos documentaron rendimientos promedio de biomasa del sotobosque de 23.5 ton/ha (Ku y Baker, 1993) .

En bosques naturales de pino-encino de México, Mejía Canales et al. (2018) destacaron la importancia ecológica del sotobosque herbáceo y arbustivo como componente esencial para procesos del ciclo de nutrientes y la trayectoria sucesional. Estudios comparativos en bosques templados de Oaxaca reportaron biomasa herbácea superior en pinares ( $p = 0.009$ ) comparado con otros tipos de vegetación lo que concuerda con los mayores valores observados en las parcelas de siembra directa de este estudio (Navarro-Martínez et al., 2024). Los resultados sugieren que las áreas restauradas mediante siembra directa en Polvorín están desarrollando niveles de biomasa herbácea comparables a ecosistemas naturales de referencia, indicando una recuperación funcional apropiada del componente de sotobosque en los procesos de restauración implementados.

### ***Regeneración Natural***

La evaluación de la regeneración natural reveló patrones contrastantes entre estratos y sitios, proporcionando información crítica sobre la capacidad de recuperación autogénica del ecosistema. Según Guariguata y Ostertag (2001), la caracterización de la regeneración natural es fundamental para comprender la trayectoria sucesional y el potencial de autorecuperación de los ecosistemas en proceso de restauración.

#### **Estrato de Brinzales.**

El estrato de brinzales (DAP < 5 cm) mostró la mayor abundancia entre todos los estratos evaluados, alcanzando densidades máximas de 3,200 individuos/ha en Polvorín y mínimas de 250 individuos/ha en La Torre. Esta alta densidad de individuos juveniles indica un potencial significativo de regeneración natural, particularmente en Polvorín.

#### **Estrato de Latizales.**

Paradójicamente, el estrato de latizales (DAP 5-10 cm) presentó un patrón inverso al observado en brinzales. Polvorín registró la menor densidad con apenas 400 individuos/ha, mientras

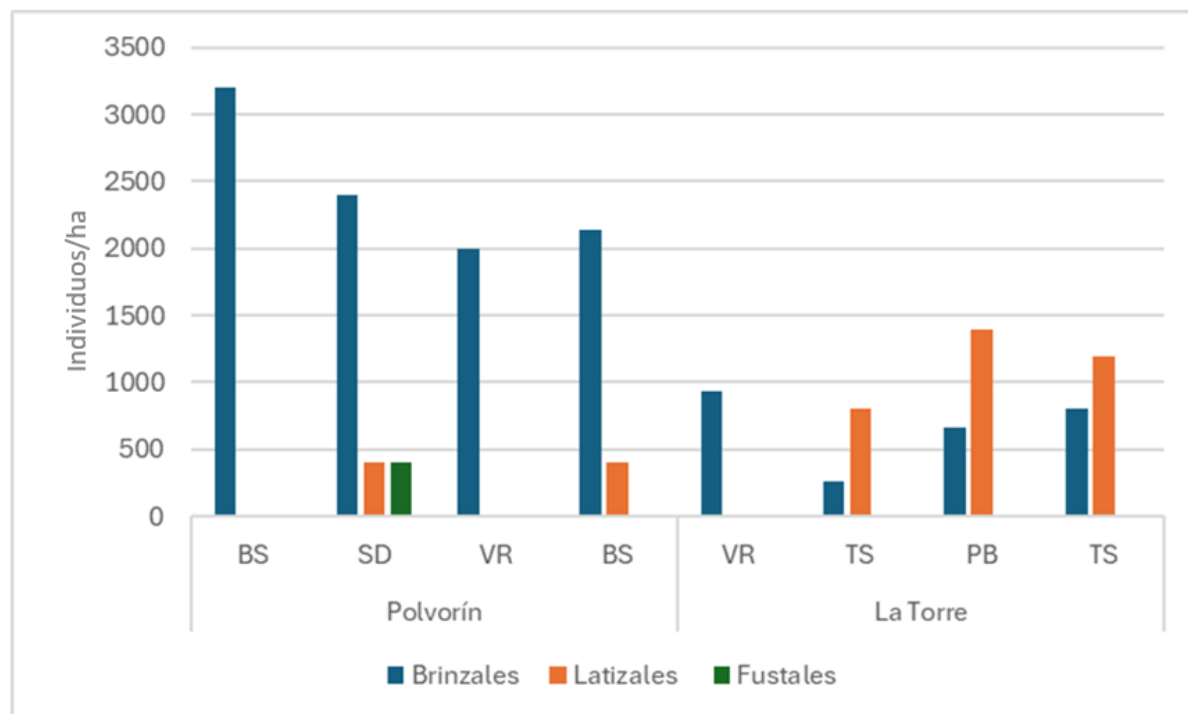
que La Torre alcanzó hasta 1,400 individuos/ha. Esta inversión sugiere procesos sucesionales diferenciados entre sitios, posiblemente relacionados con el tiempo transcurrido desde las intervenciones de restauración o las condiciones de micrositio específicas.

#### Estrato de Fustales.

El estrato de fustales ( $DAP \geq 10$  cm) mostró la menor representación en ambos sitios, registrando únicamente 400 individuos/ha en Polvorín, mientras que La Torre careció completamente de individuos en esta categoría. Este patrón refleja el estado temprano de la sucesión secundaria en ambos sitios (Figura 13). Estudios realizados sobre regeneración natural en la cuenca Santa Inés demuestran una alta densidad de individuos juveniles (brinzales) establecidos de forma natural; no obstante, se observa una marcada disminución en la densidad de latizales y una presencia prácticamente nula de fustales (Barrera Jiménez et al., 2024; Della Sera, 2022).

**Figura 13**

*Densidad de individuos de cada uno de los estratos por método de propagación y sitio de estudio*



La distribución diamétrica observada, caracterizada por abundantes brinzales, pero escasos latizales y fustales, es típica de ecosistemas forestales en recuperación temprana. Rozendaal et al. (2019) identificaron este patrón como indicativo de "cuellos de botella demográficos" donde los factores limitantes impiden la transición exitosa entre clases diamétricas. Los cuellos de botella observados pueden atribuirse a múltiples factores. Holl (2017) documentó que la limitación en dispersión de semillas, la competencia con especies invasoras, y las condiciones microclimáticas adversas constituyen los principales obstáculos para la progresión de brinzales a latizales en ecosistemas en restauración.

La ausencia de fustales en La Torre y su escasa presencia en Polvorín sugiere que ambos sitios se encuentran en etapas iniciales de la sucesión secundaria. Letcher y Chazdon (2009) reportaron que el establecimiento de fustales en bosques secundarios tropicales requiere típicamente 15-20 años, período que puede extenderse en sitios con limitaciones edáficas o climáticas severas.

#### ***Integración: Biomasa Herbácea y Regeneración Natural***

La combinación de alta biomasa del estrato herbáceo con abundante regeneración de brinzales en Polvorín sugiere condiciones favorables para la recuperación ecosistémica integral. Chazdon (2008) argumentó que la coexistencia de un sotobosque desarrollado con regeneración natural abundante indica el restablecimiento de procesos ecológicos como el ciclaje de nutrientes y la facilitación interespecífica. Sin embargo, el cuello de botella evidente en la transición brinzales-latizales requiere atención en futuras intervenciones de manejo. Crouzeilles et al. (2017) sugirieron que la combinación de restauración activa con facilitación de procesos naturales puede acelerar la superación de estos cuellos de botella demográficos.

Los resultados sugieren que diferentes métodos de propagación generan efectos contrastantes en la recuperación del sotobosque y la regeneración natural. Los métodos que permiten mayor desarrollo del estrato herbáceo (siembra directa) pueden favorecer procesos de facilitación que benefician la regeneración natural a largo plazo. Métodos que generan mayor competencia inicial

(planta en bolsa) pueden requerir intervenciones complementarias para promover la diversidad del sotobosque.

La caracterización diferencial entre sitios refuerza la necesidad de adoptar estrategias adaptativas que consideren tanto las condiciones edáficas como los objetivos específicos de restauración para cada sitio de intervención.

## Conclusiones

Las tasas de sobrevivencia varían significativamente según la interacción método-especie-sitio. Para *Pinus sp.*, el método de planta en bolsa alcanzó la mayor sobrevivencia (51% a los 6 meses) en suelos franco-arcillo-arenosos de La Torre, mientras que, para *Quercus sp.*, la siembra directa logró 44% de sobrevivencia a los 30 meses en suelos franco-arcillosos de Polvorín. Estos resultados demuestran que no existe un método universalmente superior, sino que la efectividad depende de las características edáficas del sitio y las necesidades específicas de cada especie.

El desarrollo morfológico evidenció patrones especies-específicos contrastantes. *Pinus sp.* mostró mejor desempeño en altura y diámetro basal con métodos de vivero (planta en bolsa: 24.18 cm; vivero a raíz desnuda: 23.89 cm), mientras que *Quercus sp.* alcanzó mayor crecimiento mediante siembra directa (36.36 cm de altura, 0.464 cm de diámetro basal).

Los parámetros de calidad de las plantas confirmaron que *Quercus sp.* por bolas de semilla mostró los mejores resultados con un 72% de individuos con arquitectura del tallo óptima. Esto indica que las coníferas se benefician del desarrollo radicular controlado en vivero, mientras que las especies de *Quercus* aprovechan sus reservas nutricionales para establecimiento directo.

La siembra directa promovió mayor biomasa herbácea (27.40 ton/ha) y abundante regeneración natural (3,200 brinzales/ha), indicando un potencial significativo de recuperación autogénica del ecosistema, aunque con cuellos de botella hacia estratos superiores, evidenciando la necesidad de estrategias híbridas para restauración integral.

### Recomendaciones

Implementar métodos de vivero (planta en bolsa o vivero a raíz desnuda) para *Pinus sp.* especialmente en suelos franco-arcillo-arenosos con menor capacidad de intercambio catiónico, y priorizar siembra directa para *Quercus sp.* en suelos franco-arcillosos con mayor retención de humedad y nutrientes, precedido por análisis edáficos que incluyan textura, pH y capacidad de intercambio catiónico.

Establecer protocolos de manejo diferenciados que reconozcan las ventajas del desarrollo radicular controlado en vivero para coníferas y las reservas nutricionales de las bellotas para el establecimiento directo de *Quercus sp.*, implementando evaluaciones periódicas de parámetros de calidad (arquitectura del tallo, estado fitosanitario y vigor vegetativo) durante los primeros 30 meses.

Desarrollar estrategias específicas para cada método de propagación que promuevan la acumulación de biomasa herbácea en áreas de siembra directa e implementen intervenciones complementarias en zonas de planta en bolsa, junto con programas de enriquecimiento dirigidos a facilitar la transición de brinzales a latizales y superar los cuellos de botella demográficos identificados.

Implementar sistemas de seguimiento que evalúen la progresión de la restauración durante al menos 5-10 años, incluyendo indicadores de sobrevivencia, crecimiento, calidad de plántulas y recuperación funcional del ecosistema para validar la sostenibilidad de los métodos de propagación empleados y optimizar futuras intervenciones de restauración forestal.

## Referencias

- Acero Nitola, A. M. y Cortés Pérez, F. (2014). Propagación de especies nativas con potencial para restauración ecológica en la microcuenca río La Vega, Tunja-Boyacá. *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales*, 38(147), 195. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.76>
- Aguilera, E., Arevalo, G. y Sanchez-Amaya, J. (2022). *LSZ-MT-P00 Manual de Procedimientos Técnicos Laboratorio de Suelos Zamorano*. EAP Zamorano. [https://www.researchgate.net/publication/361244395\\_LSZ-MT-P00\\_Manual\\_de\\_Procedimientos\\_Tecnicos\\_Laboratorio\\_de\\_Suelos\\_Zamorano](https://www.researchgate.net/publication/361244395_LSZ-MT-P00_Manual_de_Procedimientos_Tecnicos_Laboratorio_de_Suelos_Zamorano)
- Alberto, D. y Elvir, J. A. (2008). Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales en Honduras. *Investigación Agraria: Sistemas Y Recursos Forestales*, 17(1), 67–78. <https://pdfs.semanticscholar.org/fb43/5606d173e3c9716510766049ae8828d757d4.pdf>
- Arroyo Rodríguez, V., Melo, F. P. L., Martínez-Ramos, M., Bongers, F., Chazdon, R. L., Meave, J. A., Norden, N., Santos, B. A [Bráulio A.], Leal, I. R. y Tabarelli, M. (2017). Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: New insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 92(1), 326–340. <https://doi.org/10.1111/brv.12231>
- ASTM International (2019). *Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*. ASTM International.
- Barrera Jiménez, E. R., Castro, J. y Aguirre, Z. (2024). Parámetros poblacionales y regeneración natural de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, en el valle de Vilcabamba, cantón Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 14(1), 1–14. <https://doi.org/10.54753/blc.v14i1.2118>
- Bartlow, A. W., Agosta, S. J., Curtis, R., Yi, X. y Steele, M. A. (2018). Acorn size and tolerance to seed predators: The multiple roles of acorns as food for seed predators, fruit for dispersal and fuel for growth. *Integrative Zoology*, 13(3), 251–266. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12287>
- Bernaola Paucar, R. M., Zamora Natera, J. F., Vargas Radillo, J. d. J., Cetina Alcalá, V. M., Rodríguez Macías, R. y Salcedo Pérez, E. (2016). Calidad de planta en etapa de vivero de dos especies de pino en sistema Doble-Trasplante. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 7(33), 74–93. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i33.91>
- Bernaola-Paucar, R. M., Pimienta Barrios, E., Gutiérrez González, P., Ordaz Chaparro, V. M., Alejo Santiago, G. y Salcedo Pérez, E. (2018). Efecto del volumen del contenedor en la calidad y supervivencia de *Pinus hartwegii* Lindl. en sistema doble-trasplante. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 6(28), 174–187. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i28.275>
- Brady, N. C. y Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (Fifteenth edition). Pearson.
- Brancalion, P. H. S., Niamir, A., Broadbent, E., Crouzeilles, R., Barros, F. S. M., Almeyda Zambrano, A. M [Angelica M.], Baccini, A., Aronson, J., Goetz, S., Reid, J. L., Strassburg, B. B. N., Wilson, S. y Chazdon, R. L. (2019). Global restoration opportunities in tropical rainforest landscapes. *Science Advances*, 5(7), eaav3223. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav3223>

- Casanoves, F., Cifuentes Jara, M. y Chacón León, M. (2017). *Estimación del carbono a partir de inventarios forestales nacionales: Buenas prácticas para la recolección, manejo y análisis de datos*.  
[https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8696/estimacion\\_del\\_carbono\\_a\\_partir\\_de\\_inventarios.pdf?sequence=4](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8696/estimacion_del_carbono_a_partir_de_inventarios.pdf?sequence=4)
- Centro de Información y Patrimonio Forestal. (2014). *Unidad de Patrimonio Forestal: Boletín informativo*. <https://icf.gob.hn/unidad-de-patrimonio-forestal/>
- Chazdon, R. L. (2003). Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 6(1-2), 51–71.  
<https://doi.org/10.1078/1433-8319-00042>
- Chazdon, R. L. (2008). Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science (New York, N.Y.)*, 320(5882), 1458–1460.  
<http://www.jstor.org/stable/20054261>
- Crouzeilles, R., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., Lindenmayer, D. B., Sansevero, J. B. B., Monteiro, L., Iribarrem, A., Latawiec, A. E. y Strassburg, B. B. N. (2017). Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advances*, 3(11), e1701345. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701345>
- Della Sera, A. A. (2022). *Evaluación de la dinámica de regeneración natural de las especies Pinus maximinoi y Liquidámbar styraciflua en bosques mixtos de la microcuenca Santa Inés, Honduras* [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/7232>
- Duryea, M. L. (1985). *Evaluating seedling quality: Principles, procedures, and predictive abilities of major tests proceedings of the workshop held October 16-18, 1984*. Forest Research Laboratory Oregon State University.
- Eden Reforestation Projects. (2023). *Eden: For People+Planet*. <https://eden-plus.org/>
- Evans, K. A. y Guariguata, M. R. (2016). Success from the ground up: Participatory monitoring and forest restoration: Occasional Paper 159. Publicación en línea avanzada.  
<https://doi.org/10.17528/cifor/006284>
- Ferreira, M. C., Oliveira Cordeiro, A. O. de, Sampaio, A. B., Schmidt, I. B. y Vieira, D. L. M. (2023). Direct seeding versus seedling planting: survival, biomass, growth, and cost up to 6 years for four tropical seasonal tree species. *Restoration Ecology*, 31(4), Artículo e13807.  
<https://doi.org/10.1111/rec.13807>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1969). *Los suelos de Honduras*. <https://openknowledge.fao.org/items/2a0c1854-aeca-4d70-94df-526a6da01fb0>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024, 5 de noviembre). *Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report*. <https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/es/>
- Graves, S. J., Rifai, S. W. y Putz, F. E. (2014). Outer bark thickness decreases more with height on stems of fire-resistant than fire-sensitive Floridian oaks (*Quercus* spp.; Fagaceae). *American Journal of Botany*, 101(12), 2183–2188. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400412>

- Grossnickle, S. (2012). Why seedlings survive: Influence of plant attributes. *New Forests*, 43(5-6), 711–738. <https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6>
- Grossnickle, S. (2018). Seedling Establishment on a Forest Restoration Site: An Ecophysiological Perspective. *REFORESTA*(6), 110–139. <https://doi.org/10.21750/REFOR.6.09.62>
- Grossnickle, S. C. y El-Kassaby, Y. A. (2016). Bareroot versus container stocktypes: a performance comparison. *New Forests*, 47(1), 1–51. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9476-6>
- Grossnickle, S. C. y MacDonald, J. E. (2018). Why seedlings grow: influence of plant attributes. *New Forests*, 49(1), 1–34. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>
- Guariguata, M. R. y Ostertag, R. (2001). Neotropical secondary forest succession: changes in structural and functional characteristics. *Forest Ecology and Management*, 148(1-3), 185–206. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00535-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00535-1)
- Gutiérrez, B. (2020). Desempeño de progenies, procedencias y regiones de procedencia de Roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst). *Ciencia & Investigación Forestal*, 26(3), 33–50. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2020.536>
- Gutiérrez, B. y Navarrate, M. (2021). Crecimiento y supervivencia de un ensayo de procedencias y progenies de Roble (*Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst.) de 21 años de edad en Pumillahue, Región de los Ríos, Chile. *Ciencia & Investigación Forestal*, 27(2), 23–36. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.547>
- Hairiah, K. (2011). *Measuring carbon stocks: Across land use systems a manual*. Published in close cooperation with Brawijaya University and ICALRRD (Indonesian Center for Agricultural Land Resources Research and Development).
- Holl, K. D. (2017). Restoring tropical forests from the bottom up. *Science (New York, N.Y.)*, 355(6324), 455–456. <https://doi.org/10.1126/science.aam5432>
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. (2016). *Mexico, Central America and the Caribbean*. <https://iucn.org/our-work/region/mexico-central-america-and-caribbean>
- Jacobs, D. F., Salifu, K. F. y Seifert, J. R. (2005). Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting. *Forest Ecology and Management*, 214(1-3), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.053>
- José Navarro-Martínez, Flaviano Godínez-Jaimes, José Luis Rosas-Acevedo y Jorge Méndez-González (2024). Reservorio de carbono en necromasa y sotobosque en un ecosistema forestal templado de Guerrero, México: Reservorio de carbono en necromasa y sotobosque. *Madera y Bosques*, 30(3), e3032683-e3032683. <https://doi.org/10.21829/myb.2024.3032683>
- Ku, T. T. y Baker, J. B. (1993). *Understory biomass from southern pine forests as a fuel source* (National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States) núm. NREL/CP-200-5768-Vol.1; CONF-9308106-Vol.1). <https://www.osti.gov/biblio/140299>
- Letcher, S. G. y Chazdon, R. L. (2009). Rapid Recovery of Biomass, Species Richness, and Species Composition in a Forest Chronosequence in Northeastern Costa Rica. *Biotropica*, 41(5), 608–617. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2009.00517.x>

- Lin, H.-T., Lam, T. Y., Gadow, K. von y Kershaw, J. A. (2020). Effects of nested plot designs on assessing stand attributes, species diversity, and spatial forest structures. *Forest Ecology and Management*, 457, 117658. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117658>
- Löf, M., Madsen, P., Metslaid, M., Witzell, J. y Jacobs, D. F. (2019). Restoring forests: regeneration and ecosystem function for the future. *New Forests*, 50(2), 139–151. <https://doi.org/10.1007/s11056-019-09713-0>
- Lu, Y., Ranjitkar, S., Xu, J.-C., Ou, X.-K., Zhou, Y.-Z., Ye, J.-F., Wu, X.-F., Weyerhaeuser, H. y He, J. (2016). Propagation of Native Tree Species to Restore Subtropical Evergreen Broad-Leaved Forests in SW China. *Forests*, 7(1), 12. <https://doi.org/10.3390/f7010012>
- Martínez, H. A. (2014). *Preselección de especies en la consultoría "Fomento de la reforestación comercial para la mejora y conservación de las reservas de carbono"*. Fondo Nacional de Fomento Forestal (FONAFIFO).
- Mata Balderas, J. M., Treviño Garza, E. J., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O., Alanís Rodríguez, E. y Salinas Castillo, W. E. (2010). Evaluación de la siembra directa con especies de pino en la restauración de un ecosistema semiárido-templado. *Ciencia UANL*, 13(1), 72-77-77. <https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-uanl/articulo/evaluacion-de-la-siembra-directa-con-especies-de-pino-en-la-restauracion-de-un-ecosistema-semiarido-templado>
- Mataruga, M., Cvjetković, B., Cuyper, B. de, Aneva, I., Zhelev, P., Cudlín, P., Metslaid, M., Kankaanhuhta, V., Collet, C., Annighöfer, P., Mathes, T., Marianthi, T., Despoina, P., Jónsdóttir, R. J., Cristina Monteverdi, M., Dato, G. de, Mariotti, B., Dina Kolevska, D., Lazarević, J., . . . Villar-Salvador, P. (2023). Monitoring and control of forest seedling quality in Europe. *Forest Ecology and Management*, 546, 121308. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121308>
- Mejía Canales, A., Franco-Maass, S., Endara Agramont, A. R. y Ávila Akerberg, V. (2018). Caracterización del sotobosque en bosques densos de pino y oyamel en el Nevado de Toluca, México. *Madera Y Bosques*, 24(3). <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431656>
- Monzón López, S. (2020). *Diferencias de supervivencia y crecimiento en repoblaciones forestales entre plantas cultivadas en contenedor y a raíz desnuda* [Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas., Universidad de Alcalá, Madrid]. [ebuah.uah.es. https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/45479](https://ebuah.uah.es/dspace/handle/10017/45479)
- Mora, J. M. y López, L. I. (2013). El Manejo de la Reserva Biológica Uyuca en el Contexto Nacional y Global del Sistema de Áreas Protegidas. *Ceiba*, 52(1), 39–54. <https://doi.org/10.5377/ceiba.v52i1.976>
- Muñoz Flores, H. J., García Magaña, J. J., Orozco Gutiérrez, G., Coria Ávalos, V. M. y Nájera-Rincón, M. B. (2013). Evaluación de una plantación con dos especies tropicales cultivadas en diferentes tipos de envases. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 4(18), 28–43. <https://doi.org/10.29298/RMCF.V4I18.387>
- Navarro, M., Febles, G. y Herrera, R. S. (2015). El vigor, elemento indispensable de la calidad de las semillas. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 49(4). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s2079-34802015000400003&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s2079-34802015000400003&script=sci_arttext&tlng=en)

- Oliva, M., Vacalla, F., Pérez, D. y Tucto, A. (2014). *Manual viveros forestales para producción de plantones de especies forestales nativas: experiencia en molinopampa, amazonas - Perú*.
- Peña Vanegas, R. A. (2020). *Manual técnico para la interpretación de análisis de suelos y fertilización de cultivos*. Universidad de la Salle.
- Pérez Almario, N., Eduardo Orjuela, Ó., Thomas Carvajal, C. y Criollo Cruz, D. (2022). *Metodologías para la evaluación de biomasa forrajera de especies leñosas en zonas cálidas*. Corporación colombiana de investigación agropecuaria - AGROSAVIA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7405750.cap4>
- Poorter, L., Craven, D., Jakovac, C. C., van der Sande, M. T., Amisshah, L., Bongers, F., Chazdon, R. L., Farrior, C. E., Kambach, S., Meave, J. A., Muñoz, R., Norden, N., Rüger, N., van Breugel, M., Almeyda Zambrano, A. M [Angélica María], Amani, B., Andrade, J. L., Brancalion, P. H. S., Broadbent, E. N., . . . Hérault, B. (2021). Multidimensional tropical forest recovery. *Science (New York, N.Y.)*, 374(6573), 1370–1376. <https://doi.org/10.1126/science.abh3629>
- Portillo Reyes, H. O., Suazo, J. P., Mejía, D., Girón, I., Moradel, B., Turcios, A., Reyes, C., Pagoada, C., Medina, I., Martínez, L., Vásquez, Z., Marineros, L., Elvir, F., Vega, H., Hernández, J [Jonathan], Cerna, D., Hernández, J [Jenifer], Vílchez, L., Rico, E., . . . Inestroza, T. (2016). Diversidad y riqueza para tres sitios del bosque de pino-encino en el departamento de Olancho, Honduras. *Scientia Hondurensis*, 1(3), 136–156.
- Pramanik, K., Mohapatra, P. P., Jena, C. y Kumar, D. S. (2020). Application of 3-4-5 Rule in Agriculture: A Review. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 37–41. <https://doi.org/10.9734/CJAST/2020/v39i3130987>
- Puttonen, P. (1989). Criteria for using seedling performance potential tests. *New Forests*, 3(1), 67–87. <https://doi.org/10.1007/BF00128902>
- Rascón, J., Juárez, L. y Silva, J. (2022). Diagnóstico de suelos con fines de reforestación con *Pinus patula* en un cuenca del nororiente peruano. *Advances in Science and Innovation*, 1(1), 22–33. <https://doi.org/10.61210/asi.v1i1.3>
- Ritchie, G. A. (1984). Assessing Seedling Quality. En M. L. Duryea, T. D. Landis y C. R. Perry (Eds.), *Forestry Sciences: Vol. 11. Forestry Nursery Manual: Production of Bareroot Seedlings* (Vol. 11, pp. 243–259). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-6110-4\\_23](https://doi.org/10.1007/978-94-009-6110-4_23)
- Rodrigues, S. B., Freitas, M. G., Campos-Filho, E. M., do Carmo, G. H. P., da Veiga, J. M., Junqueira, R. G. P. y Vieira, D. L. M. (2019). Direct seeded and colonizing species guarantee successful early restoration of South Amazon forests. *Forest Ecology and Management*, 451, 117559. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117559>
- Rozendaal, D. M. A., Bongers, F., Aide, T. M., Alvarez-Dávila, E., Ascarrunz, N., Balvanera, P., Becknell, J. M., Bentos, T. V., Brancalion, P. H. S., Cabral, G. A. L., Calvo-Rodriguez, S., Chave, J., César, R. G., Chazdon, R. L., Condit, R., Dallinga, J. S., Almeida-Cortez, J. S. de, Jong, B. de, Oliveira, A. de, . . . Poorter, L. (2019). Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. *Science Advances*, 5(3), eaau3114. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau3114>
- Rustam, E., Sudrajat, D. J., Nurhasbi, N., Widayani, N. y Surono, S. (2023). Possibility of bare-root seedling application for tropical forest and landscape restoration: A study on *Gmelina arborea*

and *Calophyllum inophyllum*. *E3S Web of Conferences*, 373, 5005.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202337305005>

Sigala Rodríguez, J. Á., González Tagle, M. A. y Prieto Ruíz, J. Á. (2018). Supervivencia en plantaciones de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en función del sistema de producción y preacondicionamiento en vivero. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 6(30), 20–31.  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i30.205>

Sosa, D. A. (2012). *Guía Manejo de suelos: Técnicas de toma y remisión de muestras de suelos*. Centro Regional Misiones.

Torres Rojo, J. M. (2021). Factores ambientales y físicos que afectan la supervivencia de siete especies forestales en el Estado de México. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 12(64).  
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.831>

Vargas Ríos, O. (2011). *Restauración ecológica: Biodiversidad y conservación* (Vol. 16). Acta Biológica Colombiana.  
[http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0120-548x2011000200017&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0120-548x2011000200017&script=sci_arttext)

## Anexos

### Anexo A

#### *Metodología de recolección de muestras de suelo en campo*

**Paso 1.** Se retiró toda la hojarasca, gramíneas o vegetación presente en la superficie de un área de 50 x 50 cm.



**Paso 2.** Con un palín, se realizó una excavación en forma de "V" a una profundidad de 30 a 40 cm. De las paredes del perfil se tomó una porción de suelo del tamaño del palín



**Paso 3.** Con un machete limpio, se recortaron los bordes de la muestra y se extrajo aproximadamente 100 gramos del centro del palín, los cuales se colocaron en un balde.



**Paso 4.** Una vez recolectadas todas las submuestras, se mezclaron en el balde hasta obtener una muestra compuesta homogénea.



**Paso 5.** De esta mezcla, se tomaron 1 kg de suelo, los cuales se colocaron en una bolsa plástica limpia.



## Anexo B

## Resultados del análisis de suelo



ESCUELA AGRÍCOLA PANAMERICANA LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO			
LSZ-MC-F31 INFORME DE RESULTADOS	ANÁLISIS DE SUELOS	Versión	3

Sistema de Gestión de Calidad ISO/IEC 17025

Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Envío Informe	Procedencia de la muestra	Página
Ashlie Alvarado	2025-02-11	2025-05-07	Uyuca, F.M.	1 de 2
Dirección del cliente	N° Lote de Análisis	Cultivo	Informe N°	Anexo Recomendación
EAP Zamorano	204-04	-	2025-54	Sí: No: x

Alto
Medio
Bajo

Código	Identificación de la muestra	Textura	Granulometría (%)			pH* (H <sub>2</sub> O)	%			mg.kg <sup>-1</sup> P
			Arena	Limo	Arcilla		C.O.*	M.O.	N <sub>total</sub>	
25-S-0927	Muestra Compuesta A	Franco Arcilloso	44	28	28	5.97	3.08	5.31	0.27	3
25-S-0928	Muestra Compuesta B	Franco Arcillo Arenoso	58	18	24	5.53	3.07	5.30	0.27	3

ND: NO DETECTADO

Rango Medio	1.2	2	0.1	13
	2.3	4	0.2	30

Código	Identificación de la muestra	Complejo de cambio (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )					cmol <sub>c</sub> .k g <sup>-1</sup> CICE	Saturación de bases (%)				Relaciones iónicas			
		Ca	Mg	K	Na	Al (Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup> )		Ca	Mg	K	Na	Ca/Mg	Mg/K	Ca/K	Ca+Mg/K
25-S-0927	Muestra Compuesta A	7.51	2.44	0.74	-0.11	0.1	10.68	70.34	22.87	6.92	-1.07	3.1	3.3	10.2	13.5
25-S-0928	Muestra Compuesta B	4.73	2.22	0.71	-0.13	0.1	7.62	62.01	29.07	9.29	-1.69	2.1	3.1	6.7	9.8

Rango Medio	5.0	1.48	0.38	< 1	< 1	10	55	15	3	< 5	3	8	15	20
	12.5	2.06	0.72			20	70	20	5		6	10	30	40

Métodos: K, Ca, Mg, Na: Solución extractora Mehlich 3, determinados por espectrofotometría de absorción atómica. P: Solución extractora Mehlich 3, determinado por colorimetría. % Carbono Orgánico: Método de Walkley & Black para suelos minerales no salinos. % N total: 5% de M.O. pH: 1:1 en agua: AOAC 994.16 rango de 4,00-10,00. Textura: Método de Bouyoucos. Al (Acidez intercambiable): estimación a partir del pH.

Nota. Muestra Compuesta A: Polvorín; Muestra Compuesta B: La Torre.

### Anexo C

#### *Coordenadas UTM de la ubicación de cada parcela*

Sitio	Polígono	No. de parcela	Coordenada X	Coordenada Y
Polvorín	1	1	495337	1549405
		2	495295	1549421
		3	495249	1549440
	2	1	495298	1549449
		2	495319	1549442
		3	495330	1549437
	3	1	495314	1549469
		2	495307	1549465
		3	495245	1549442
	4	1	495252	1549445
		2	495241	1549437
		3	495244	1549442
La Torre	5	1	494629	1550075
		2	494557	1550103
		3	494552	1550117
	6	1	494399	1550303
		2	494379	1550319
		3	494361	1550333
	7	1	494441	1550193
		2	494413	1550215
		3	494405	1550231
	8	1	494640	1550393
		2	494610	1550416
		3	494596	1550436

Nota. Coordenadas X, Y= UTM, WGS84, 16 N.



## Anexo E

### *Especies establecidas de forma natural en el sitio de estudio*

Nombre común	Nombre científico
Guayabo	<i>Psidium guajava</i>
Pino	<i>Pinus sp.</i>
Carbón	<i>Mimosa tenuiflora</i>
Azota caballo	<i>Luehea seemanii</i>
Roble	<i>Quercus sp.</i>
Conchita	<i>Montanoa hibiscifolia</i>
Quebracho	<i>Aspidosperma quebracho-blanco</i>
Capulín	<i>Prunus serotina</i>
Guayabo	<i>Psidium guajava</i>
Vara blanca	<i>Alnus acuminata</i>