UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

FACULTA DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL Y AMBIENTAL

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO MORFOLÓGICO POST-REPIQUE DE *Eucalyptus deglupta* Blume EN DIFERENTES SUSTRATOS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL YANAYACU-INIA

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO FORESTAL Y AMBIENTAL

Autores: Bach. Jerson Tantalean Martinez

Bach. Jairo Avellaneda Delgado

Asesora: Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo

Línea de investigación: Conservación, manejo y aprovechamiento de los recursos naturales

JAÉN - PERÚ

2026

Tantalean Martinez Jerson Y Avellaneda Delgado J...

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO MORFOLÓGICO POST-REPIQUE DE Eucalyptus deglupta Blum...

Quick Submit

Quick Submit

Universidad Nacional de Jaen

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::1:3680491247

Fecha de entrega
15 oct 2026, 3:02 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
15 oct 2026, 3:06 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
VELLANEDA-INFORME_FINAL_DE_TESIS_-_JERSON_TANTALEAN_MARTINEZ.pdf

Tamaño del archivo
5.1 MB

62 páginas

12.897 palabras

69.235 caracteres

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
Dra. María Marleni Torres Cruz
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

4% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

3%	Fuentes de Internet
0%	Publicaciones
3%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° de alerta de integridad para revisión

Texto oculto
8 caracteres sospechosos en N.° de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Dra. María Marleni Torres Cruz
Responsable de la Unidad de Investigación
de la Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2018-SUNEDU/CD

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 15 de octubre del año 2026, siendo las 10:00 horas, se reunieron de manera presencial los integrantes del Jurado:

Presidente : Dr. Mario Ruíz Ramos
Secretario : Dr. Cirilo Mario Caira Mamani
Vocal : Mg. Juan Ernesto Izquierdo Pardo
para evaluar la Sustentación del Informe Final:

( ) Trabajo de Investigación
(X) Tesis
( ) Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado: **"EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO MORFOLÓGICO POST-REPIQUE DE *Eucalyptus deglupta* Blume EN DIFERENTES SUSTRATOS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL YANAYACU-INIA"** presentado por los Bachilleres, Jairo Avellaneda Delgado y Jerson Tantalean Martinez de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal Y Ambiental

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

(X) Aprobar ( ) Desaprobar (X) Unanimidad ( ) Mayoría

Con la siguiente mención:

a)	Excelente	18, 19, 20	( )
b)	Muy bueno	16, 17	(17)
c)	Bueno	14, 15	( )
d)	Regular	13	( )
e)	Desaprobado	12 ò menos	( )

Siendo las 11:15 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Presidente
Dr. Mario Ruíz Ramos

Secretario
Dr. Cirilo Mario Caira Mamani

Vocal
Mg. Juan Ernesto Izquierdo Pardo

“Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia”

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS (PREGRADO)

Yo, Jerson Tantalean Martinez, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Jaén, identificado con DNI 74876385.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

   “**EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO MORFOLÓGICO POST-REPIQUE DE *Eucalyptus deglupta* Blume EN DIFERENTES SUSTRATOS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL YANAYACU-INIA**”
   Asesorado por **Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo**.
   El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar; el Título Profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.
6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 4 de noviembre del 2026.



_____

Jerson Tantalean Martinez



Huella

"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ANEXO N°06:

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD Y DE NO PLAGIO

DE LA TESIS (PREGRADO)

Yo**,** Jairo Avellaneda Delgado, egresado de la carrera Profesional de Ingeniería Forestal Y Ambiental de la Facultad de Ingeniería Forestal y Ambiental de la Universidad Nacional de Jaén, identificado (a) con DNI 45621815.

Declaro bajo juramento que:

1. Soy Autor del trabajo titulado:

   "**EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO Y DESARROLLO MORFOLÓGICO POST-REPIQUE DE *Eucalyptus deglupta* Blume EN DIFERENTES SUSTRATOS EN EL CENTRO EXPERIMENTAL YANAYACU-INIA**".
   Asesorado por **Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo**. El mismo Que presento bajo la modalidad de tesis para optar; Título Profesional de Ingeniero Forestal y Ambiental.

2. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros, incluidos los derechos de propiedad intelectual. En el sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.

3. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.

4. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

5. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad Nacional de Jaén.

6. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, es objeto de sanciones universitarias y/o legales.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad Nacional de Jaén y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: Jaén, 04 de noviembre del 2026



Jairo Avellaneda Delgado.

ÍNDICE

ÍNDICE ---- 2
ÍNDICE DE TABLAS ---- 3
ÍNDICE DE FIGURAS ---- 4
RESUMEN ---- 5
ABSTRACT ---- 6
I. INTRODUCCIÓN ---- 7
II. MATERIALES Y MÉTODOS ---- 9
2.1. Área de estudio ---- 9
2.2. Materiales, insumos, equipos y programas ---- 11
2.3. Población, muestra y muestreo ---- 11
2.4. Metodología ---- 12
III. RESULTADOS ---- 19
3.1. Respuesta del crecimiento post-repique de *E. deglupta* Blume en diferentes sustratos ---- 19
3.2. Influencia de los sustratos en el desarrollo morfológico de *E. deglupta* en diferentes sustratos ---- 24
3.3. Características físicas y químicas de los diferentes sustratos ---- 32
3.4. Mortalidad y comportamiento del tratamiento T4 ---- 34
IV. DISCUSIÓN ---- 35
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES ---- 39
5.1. Conclusiones ---- 39
5.2. Recomendaciones ---- 40
VI. REFERENCIAS ---- 41
AGRADECIMIENTO ---- 45
DEDICATORIA ---- 46
ANEXOS ---- 47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Medias y desviación estándar de la altura por tratamiento y fecha de evaluación.. 20
Tabla 2 Medias y desviación estándar del diámetro basal por tratamiento y fecha de evaluación 21
Tabla 3 Medias y desviación estándar de numero de hojas por tratamiento y fecha de evaluación 23
Tabla 4 Media y desviación estándar del área foliar por tratamiento 24
Tabla 5 Media y desviación estándar del índice critico de clorofila (SPAD) por tratamiento y fecha de evaluación 25
Tabla 6 Media y desviación estándar del índice de lignificación por tratamiento 29
Tabla 7 Media y desviación estándar del índice de robustez por tratamiento 30
Tabla 8 Media y desviación estándar del índice de Calidad de Dickson por tratamiento 32
Tabla 9. Propiedades físicas de las mezclas de sustratos evaluadas. 33
Tabla 10 Propiedades químicas de las mezclas de sustratos evaluadas 34
Tabla 11 Base de datos del crecimiento y desarrollo morfológico de los plantones 47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de desarrollo de la investigación (vivero del Centro Experimental Yanayacu-INIA) 9
Figura 2 Distribución de las 16 unidades experimentales bajo un diseño completamente al azar..... 13
Figura 3. Altura (cm) de *E. deglupta* durante los 90 días posteriores al repique en diferentes mezclas de sustratos..... 20
Figura 4 Diámetro basal (mm) de *E. deglupta* durante los 90 días posteriores al repique en diferentes mezclas de sustratos..... 22
Figura 5. Número de hojas de *E. deglupta* durante los 90 días posteriores al repique en diferentes mezclas de sustratos..... 23
Figura 6. Área foliar (cm²) de *E. deglupta* en diferentes mezclas de sustratos. 24
Figura 7. Índice crítico de clorofila (unidades SPAD) de *E. deglupta* en diferentes mezclas de sustratos. 26
Figura 8. Biomasa húmeda (g) de *E. deglupta* en diferentes mezclas de sustratos. 27
Figura 9 Biomasa seca (g) de *E. deglupta* en diferentes mezclas de sustratos..... 28
Figura 10. Índice de lignificación de *E. deglupta* en diferentes mezclas de sustratos. 30
Figura 11 Índice de robustez de *E. deglupta* en diferentes mezclas de sustratos. 31
Figura 12. Índice de Calidad de Dickson de *E. deglupta* en diferentes mezclas de sustratos. 32

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en el Centro Experimental Yanayacu del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), Jaén, Cajamarca, con el propósito de evaluar la influencia de diferentes mezclas de sustratos en el crecimiento y desarrollo morfológico post-repique de *Eucalyptus deglupta* Blume. La investigación utilizo un diseño experimental completamente al azar (DCA), con 4 tratamientos: T1 (arena, compost, humus, tierra agricola y biochar; 1:1:1:1:1), T2 (arena, compost y tierra agricola; 1:1:2), T3 (arena, humus y biochar; 3:4:3) y T4 (compost, humus y tierra agricola; 3:3:4). Se realizó en el repique y manejo de las plántulas bajo condiciones de vivero, evaluándo la altura, diámetro basal, número de hojas, área foliar, contenido relativo de clorofila, biomasa húmeda y seca, índice de lignificación, índice de robustez e Índice de Calidad de Dickson (ICD). Los resultados mostraron diferencias significativas entre los tratamientos para altura, diámetro basal, número de hojas, contenido relativo de clorofila, biomasa húmeda, biomasa seca e ICD ($p < 0.05$). El T2 presentó los mayores valores de altura (28.37 cm), diámetro basal (2.69 mm), contenido relativo de clorofila (44.87 unidades SPAD), biomasa húmeda (18.47 g), biomasa seca (6.16 g) e ICD (0.376). T2 y T3 mostraron respuestas estadísticamente similares en algunas variables, mientras que T4 presentó mortalidad total antes de finalizar el periodo experimental. En conjunto, los resultados evidencian una respuesta diferenciada de *E. deglupta* a la composición del sustrato, destacando el T2 como el sustrato que influyó significativamente en el crecimiento y desarrollo morfológico.

Palabras clave: *eucalipto, vivero forestal, sustrato, calidad de planta, biomasa vegetal, clorofila*

ABSTRACT

The present study was conducted at the Yanayacu Experimental Center of the National Institute for Agrarian Innovation (INIA), Jaen, Cajamarca, to evaluate the influence of different substrate mixtures on the post-transplant growth and morphological development of *Eucalyptus deglupta* Blume. The research used a completely randomized design (CRD) with four treatments: T1 (sand, compost, humus, agricultural soil, and biochar; 1:1:1:1:1), T2 (sand, compost, and agricultural soil; 1:1:2), T3 (sand, humus, and biochar; 3:4:3), and T4 (compost, humus, and agricultural soil; 3:3:4). Seedling transplanting and management were carried out under nursery conditions, evaluating height, basal diameter, number of leaves, leaf area, relative chlorophyll content, fresh and dry biomass, lignification index, sturdiness index, and Dickson Quality Index (DQI). The results showed significant differences among treatments for height, basal diameter, number of leaves, relative chlorophyll content, fresh biomass, dry biomass, and DQI ($p < 0.05$). T2 presented the highest values for height (28.37 cm), basal diameter (2.69 mm), relative chlorophyll content (44.87 SPAD units), fresh biomass (18.47 g), dry biomass (6.16 g), and DQI (0.376). T2 and T3 showed statistically similar responses for some variables, whereas T4 experienced complete mortality before the end of the experimental period. Overall, the results demonstrate a differentiated response of *E. deglupta* to substrate composition, with T2 standing out as the substrate that significantly influenced growth and morphological development.

Keywords: *eucalyptus, forest nursery, substrate, seedling quality, plant biomass, chlorophyll.*

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques cumplen funciones esenciales para la conservación de la biodiversidad, la regulación climática, el almacenamiento de carbono, la protección del suelo y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos. Sin embargo, la deforestación, el cambio de uso de la tierra y los incendios continúan afectando estos ecosistemas, por lo que la restauración y las plantaciones forestales constituyen estrategias importantes frente a la degradación ambiental y el cambio climático (FAO, 2022; IPCC, 2023). En este contexto, la calidad del material vegetal producido en vivero constituye un factor determinante para el establecimiento y desempeño posterior de las plantas en campo (Grossnickle & MacDonald, 2018; Lamhamedi et al., 2023).

La calidad de las plantas forestales depende de la interacción entre sus características morfológicas, fisiológicas y las condiciones de producción. La etapa de vivero influye en la arquitectura de las plantas, la acumulación de biomasa y su capacidad de adaptación posterior, por lo que su evaluación debe considerar un conjunto de atributos y no únicamente el crecimiento en altura (Grossnickle & MacDonald, 2018; Mataruga et al., 2023). Asimismo, prácticas de manejo y condiciones ambientales durante la producción pueden modificar las características de las plantas y su comportamiento posterior al establecimiento (Guimarães et al., 2024; Dixit & Burney, 2024).

El sustrato constituye uno de los principales factores de manejo en vivero, debido a que proporciona el ambiente físico y químico para el desarrollo radical. Sus propiedades de porosidad, densidad, retención de agua, aireación, pH, conductividad eléctrica y disponibilidad de nutrientes condicionan la absorción de agua y nutrientes y, por tanto, el crecimiento de las plántulas (Boudreault et al., 2023; Mariotti et al., 2023). Por ello, la formulación de las mezclas debe buscar un equilibrio entre humedad, aireación, drenaje y disponibilidad de nutrientes, evitando condiciones que puedan limitar el desarrollo radical. El empleo de materiales orgánicos y minerales, así como de componentes capaces de mejorar la retención hídrica y las condiciones del medio, puede contribuir a obtener plantas de mayor calidad (Stahl et al., 2022; Amaringo-Cordova et al., 2025).

La respuesta de las plantas a los sustratos puede determinarse mediante variables de crecimiento y calidad. La altura, diámetro basal, número de hojas y área foliar permiten

caracterizar el crecimiento vegetativo, mientras que la biomasa expresa la acumulación de materia vegetal. De manera complementaria, el índice de lignificación, el índice de robustez y el Índice de Calidad de Dickson (ICD) permiten valorar integralmente la calidad morfológica y la distribución de biomasa entre la parte aérea y radical (Grossnickle & MacDonald, 2018; Dickson et al., 1960). Estos indicadores han sido utilizados para diferenciar la calidad de plantas forestales y relacionarla con su potencial de supervivencia y establecimiento.

Eucalyptus deglupta Blume, conocido como eucalipto arcoíris, presenta interés para ambientes tropicales debido a su crecimiento y producción de biomasa. Su utilización requiere disponer de plantas con características morfológicas y fisiológicas adecuadas desde la etapa de vivero. Investigaciones realizadas sobre la especie han evidenciado la importancia de las condiciones de producción, fertilización y sustrato en su crecimiento y desarrollo (García et al., 2023; Missio et al., 2024). La etapa posterior al repique adquiere especial importancia porque las plantas deben establecer y expandir su sistema radical en un nuevo volumen de sustrato, haciendo que las propiedades físicas e hidráulicas del medio sean determinantes para la disponibilidad de agua y oxígeno (Boudreault et al., 2023; Lamhamedi et al., 2023).

A pesar de estos antecedentes, existe limitada información sobre la respuesta de E. deglupta a diferentes formulaciones de sustratos durante la etapa post-repique bajo condiciones de vivero en el nororiente del Perú. Por ello, resulta necesario generar evidencia local que permita relacionar la composición del sustrato con indicadores de crecimiento, estado fisiológico, biomasa y calidad morfológica (Mariotti et al., 2023; Mataruga et al., 2023). En este contexto, la presente investigación busca evaluar el efecto de diferentes mezclas de sustratos sobre el crecimiento y desarrollo morfológico post-repique de E. deglupta en el Centro Experimental Yanayacu-INIA, considerando variables de crecimiento, biomasa, estado fisiológico e índices de calidad.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La investigación se realizó en el Centro Experimental Yanayacu del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicado en la provincia de Jaén, región de Cajamarca, Perú. El área experimental se encuentra ubicada a 07º 09′ 56″ S y 78º 27′ 07″ W; a 629 m s. n. m. La zona presenta condiciones de clima tropical, con temperaturas que oscilan entre 11 y 33 °C y una precipitación anual comprendida entre 350 a 1000 mm (Cubas et al., 2026) (Figura 1).

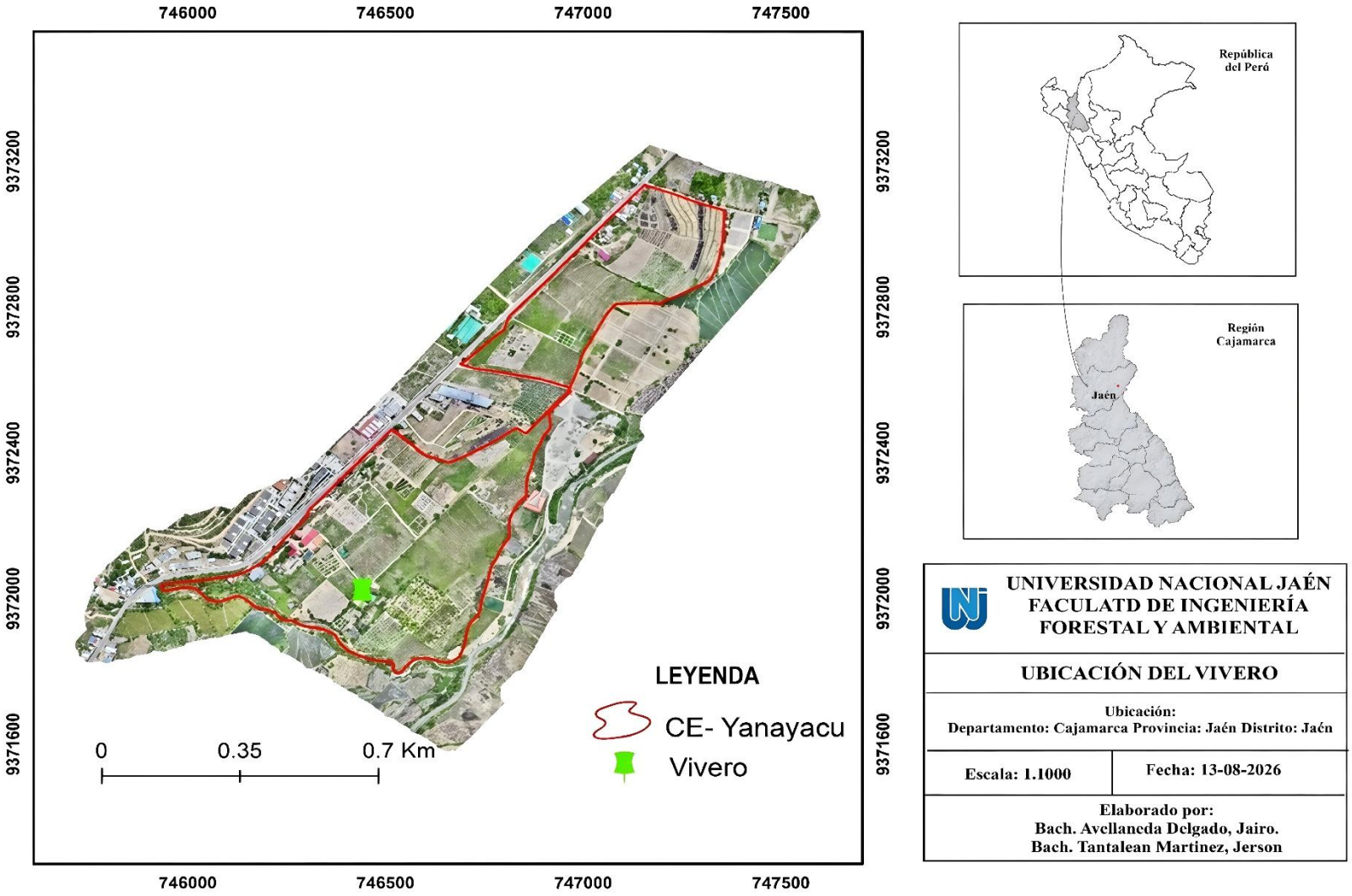
El área presenta condiciones ambientales tropicales y constituye un sitio de investigación del INIA para el desarrollo de actividades agrícolas, forestales y agroforestales. Estas características, junto con la infraestructura destinada a la investigación y transferencia tecnológica, permiten desarrollar ensayos de producción vegetal bajo condiciones locales del nororiente de Cajamarca (Instituto Nacional de Innovación Agraria, 2024; Atalaya et al., 2025).

Asimismo, el Centro Experimental Yanayacu constituye un espacio estratégico para la investigación, generación y transferencia de tecnología agraria, con actividades relacionadas con sistemas agrícolas, frutícolas, tropicales, agroforestales, silvopastoriles y manejo y recuperación de suelos degradados. En este centro funciona además un Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliares (LABSAF), implementado por el INIA para apoyar el análisis de suelos, agua de riego y material vegetal y contribuir al desarrollo de tecnologías orientadas al manejo sostenible de los sistemas productivos de Jaén y San Ignacio (INIA, 2024).

El acceso se realiza desde la ciudad de Jaén mediante la carretera Jaén–San Ignacio, con una referencia institucional de ubicación en el km 23,7 (Atalaya et al., 2025; Chuquibala et al., 2026). Desde la ciudad de Jaén, el acceso se realiza por esta carretera en dirección a San Ignacio; considerando la distancia aproximada hasta el km 23,7, el desplazamiento en vehículo puede estimarse en 20 a 30 minutos, aunque este tiempo es referencial y puede variar según las condiciones de tránsito, velocidad y estado de la vía.

Figura 1

Área de desarrollo de la investigación (vivero del Centro Experimental Yanayacu-INIA)



Nota: El punto de ubicación del área experimental fue registrado mediante un receptor GPS Garmin GPSMAP 65; la información cartográfica empleada para la elaboración de la figura fue obtenida de GEO GPS PERÚ.

2.2. Materiales, insumos, equipos y programas

Para el establecimiento y evaluación del experimento se utilizaron plántulas de *E. deglupta* Blume procedentes del vivero del Centro Experimental Yanayacu del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Para la preparación de los sustratos se emplearon arena de río, compost, humus de lombriz, tierra agrícola y cascarilla de arroz carbonizada (biochar). La arena de río fue colectada del río Amojú; el compost, el humus de lombriz y la tierra agrícola fueron obtenidos del Centro Experimental Yanayacu-INIA, mientras que la cascarilla de arroz carbonizada fue obtenida de un molino de arroz de la zona.

Los principales equipos utilizados fueron una balanza analítica, GPS Garmin GPSMAP 65, medidor portátil de clorofila SPAD-502 Plus, calibrador Vernier digital y cámara fotográfica. Asimismo, se emplearon herramientas para la preparación y manejo de los sustratos y las plantas, incluyendo zaranda con abertura de 0.5 mm, palanas, cuchillo, carretilla, regla metálica, winchas y materiales de protección personal. Para la determinación del área foliar se utilizó el programa ImageJ versión 1.54p.

2.3. Población, muestra y muestreo

2.3.1. Población

La población estuvo constituida por 1500 plántulas de *E. deglupta* Blume disponibles en el vivero del Centro Experimental Yanayacu-INIA durante el periodo de ejecución de la investigación.

2.3.2. Muestra

La muestra estuvo conformada por 320 plántulas de *E. deglupta* Blume. Estas fueron distribuidas en 4 tratamientos, con cuatro repeticiones por tratamiento y 20 plántulas por repetición, lo que correspondió a 80 plántulas por tratamiento y 320 individuos en total.

2.3.3. Muestreo

La selección de las plántulas se realizó mediante un muestreo no probabilístico intencional de acuerdo a (Otzen & Manterola, 2017), considerando como criterios de inclusión la uniformidad morfológica, el adecuado estado fitosanitario y la ausencia de signos visibles de estrés. Asimismo, se consideraron características similares de altura y diámetro con la

finalidad de reducir la variabilidad inicial entre los individuos seleccionados. Posteriormente, las unidades experimentales fueron asignadas aleatoriamente a los 4 tratamientos del experimento, manteniendo 4 repeticiones por tratamiento.

2.4. Metodología

La investigación se desarrolló bajo un diseño completamente al azar (DCA), mediante la evaluación de cuatro formulaciones de sustrato. El experimento estuvo constituido por 16 unidades experimentales, correspondientes a 4 tratamientos con 4 repeticiones cada uno. Cada repetición estuvo conformada por 20 plántulas de *E. deglupta* Blume, obteniéndose 80 plántulas por tratamiento y un total de 320 plántulas en el experimento. Las unidades experimentales fueron asignadas aleatoriamente dentro del área de vivero.

2.4.1. Diseño experimental y tratamientos

Se evaluaron 4 formulaciones elaboradas a partir de arena, compost, humus de lombriz, tierra agrícola y cascarilla de arroz carbonizada (biochar), combinadas en diferentes proporciones. Los tratamientos fueron los siguientes:

- T1: arena + compost + humus de lombriz + tierra agrícola + biochar, en proporción 1:1:1:1:1.
- T2: arena + compost + tierra agrícola, en proporción 1:1:2.
- T3: arena + humus de lombriz + biochar, en proporción 3:4:3.
- T4: compost + humus de lombriz + tierra agrícola, en proporción 3:3:4.

En términos porcentuales, T1 estuvo constituido por 20 % de cada uno de sus cinco componentes; T2 por 25 % de arena, 25 % de compost y 50 % de tierra agrícola; T3 por 30 % de arena, 40 % de humus de lombriz y 30 % de biochar; y T4 por 30 % de compost, 30 % de humus de lombriz y 40 % de tierra agrícola.

Cada tratamiento contó con cuatro repeticiones de 20 plántulas. La distribución de las 16 unidades experimentales se realizó aleatoriamente dentro del área experimental, de acuerdo con el diseño completamente al azar establecido para la investigación (Figura 2).

Figura 2

Distribución de las 16 unidades experimentales bajo un diseño completamente al azar.

T2R1	T3R1	T1R1	T3R2
T1R3	T4R1	T2R4	T4R2
T3R3	T1R2	T4R3	T2R2
T4R4	T3R4	T2R3	T1R4

Nota: T1 (Tratamiento 1), T2 (Tratamiento 2), T3 (Tratamiento 3) y T4 (Tratamiento 4); R1 (Repetición 1), R2 (Repetición 2), R3 (Repetición 3) y R4 (Repetición 4), un T + R = unidad experimental, la ubicación de las unidades es al azar.

2.4.2. Preparación de los sustratos

Los componentes utilizados para preparar las mezclas fueron previamente zarandeados mediante una zaranda con abertura de 0.5 mm, con la finalidad de homogenizar el material y retirar partículas o impurezas de mayor tamaño. Posteriormente, los componentes fueron sometidos a un proceso de desinfección con formol al 40 %. Durante el periodo de desinfección se realizó remoción diaria durante 3 días, con la finalidad de homogenizar el sustrato y evitar la propagación de hongos.

Una vez acondicionados los componentes, se prepararon las mezclas correspondientes a cada tratamiento respetando las proporciones establecidas. Posteriormente, los sustratos fueron colocados en bolsas de polietileno negro de 5 × 8 pulgadas y 2 mm de espesor. Se utilizaron 320 bolsas, correspondientes a una bolsa por plántula. En total se establecieron 320 plántulas de *E. deglupta*.

2.4.3. Selección, repique y manejo de las plántulas

Se seleccionaron 320 plántulas de *E. deglupta* procedentes del vivero del Centro Experimental Yanayacu-INIA, priorizando individuos con características morfológicas y radiculares aparentemente homogéneas y adecuado estado fitosanitario. Antes del repique, las raíces fueron desinfectadas mediante la aplicación de Cupravit® a una dosis de 2 g por 2

L de agua. Posteriormente a los 30 días, cada plántula fue repicada individualmente en una bolsa acondicionada con el sustrato correspondiente a su tratamiento.

Durante los 90 días posteriores al repique se realizaron labores de manejo bajo condiciones de vivero, principalmente riego diario a necesidad y control manual de malezas. Estas actividades se aplicaron durante el periodo experimental con la finalidad de mantener las condiciones necesarias para el desarrollo de las plántulas y reducir la competencia por recursos.

2.4.4. Procedimiento para determinar la respuesta del crecimiento post-repique de *E. deglupta* Blume frente a diferentes mezclas de sustratos

Las evaluaciones de crecimiento se realizaron durante un periodo de 90 días posteriores al repique, porque esto nos permite obtener datos de cambios que se dieron en todo el procesado de evaluación de cada tratamiento. Se consideraron las siguientes variables: altura de planta, diámetro basal, número de hojas y área foliar.

- **Altura de planta.** Se determinó en centímetros, midiendo desde la superficie del sustrato hasta el ápice de cada planta mediante una regla milimétrica. El mismo criterio de medición se mantuvo para todos los individuos durante las evaluaciones.
- **Diámetro basal.** Se determinó en milímetros (mm) mediante un calibrador Vernier digital, efectuando la medición a 1 cm por encima de la superficie del sustrato. El punto de medición se mantuvo constante durante las evaluaciones.
- **Número de hojas.** Se determinó mediante conteo directo de las hojas presentes en cada planta, manteniendo el mismo criterio de conteo para todos los individuos evaluados.
- **Área foliar.** Se determinó mediante procesamiento digital de imágenes utilizando el programa ImageJ versión 1.54p. Para la obtención de las imágenes se seleccionaron hojas completamente desarrolladas y en adecuado estado sanitario, las cuales fueron colocadas sobre un fondo blanco y cubiertas con una superficie transparente para mantener una posición uniforme. Se colocó una regla junto a las hojas como referencia de escala. Las fotografías fueron obtenidas manteniendo una distancia de 20 cm entre la cámara y la superficie de evaluación y, posteriormente, fueron procesadas en ImageJ,

donde se calibró la escala para determinar el área foliar. El procedimiento se basó en el procesamiento digital descrito por Rasband (2012).

2.4.5. Procedimiento para evaluar la influencia de las diferentes formulaciones sobre la calidad morfológica de las plántulas de *E. deglupta* Blume

Se consideraron indicadores de estado fisiológico y acumulación de biomasa, así como los índices de lignificación, robustez y Calidad de Dickson.

- **Índice crítico de clorofila.** El contenido relativo de clorofila se estimó mediante un medidor portátil SPAD-502 Plus, equipo utilizado para la estimación no destructiva del contenido relativo de clorofila foliar (Ling et al., 2011; Barrantes et al., 2018). Se realizaron tres lecturas por planta y las mediciones se realizaron periódicamente durante el periodo experimental, con registros cada 15 días.
- **Biomasa húmeda total.** Al finalizar el periodo de evaluación se determinó la biomasa húmeda a partir de 10 plantas por tratamiento. Las plantas fueron extraídas y separadas en sus componentes raíz, tallo y hojas, los cuales fueron pesados inmediatamente para obtener su masa fresca. La biomasa húmeda total se obtuvo a partir de la masa fresca de los componentes de cada planta (Poorter et al., 2012).
- **Biomasa seca total.** El material vegetal utilizado para la determinación de biomasa fue sometido a secado en estufa a una temperatura de 70-90 °C durante 72 h. Finalizado el secado, los componentes fueron pesados y la biomasa seca total se determinó a partir de la suma de las masas secas correspondientes (Lambers et al., 2008; Cornelissen et al., 2003).
- **Índice de lignificación.** Se determinó a partir de la relación entre la biomasa seca total y la biomasa húmeda total, expresada porcentualmente (Muñoz et al., 2015):

$$IL = \frac{BST\ (g)}{BHT\ (g)}$$

Donde:

IL es el índice de lignificación

BST la biomasa seca total

BHT la biomasa húmeda total

- **Índice de robustez.** Se calculó mediante la relación entre la altura de la planta y el diámetro basal, de acuerdo con Tinoco y Ramírez (2014): Se considera que valores bajos representan una relación más favorable entre altura y diámetro, mientras que valores elevados indican plantas más esbeltas y potencialmente más susceptibles al estrés mecánico. La fórmula empleada fue la siguiente:

$$IR=DBH$$

Donde:

H corresponde a la altura de la planta

DB al diámetro basal

- **Índice de Calidad de Dickson.** Se determinó integrando las relaciones entre altura, diámetro basal y distribución de biomasa seca, de acuerdo con el índice propuesto por Dickson et al. (1960), ampliamente utilizado como indicador integral de calidad de plantas forestales (Novikov et al., 2023).

$$ICD = \frac{BST}{\left(\frac{H\ (cm)}{DB\ (cm)}\right) + \left(\frac{BSA\ (g)}{BSR\ (g)}\right)}$$

Donde:

BST es la biomasa seca total

H la altura de la planta

DB el diámetro basal

BSA la biomasa seca aérea

BSR la biomasa seca radicular

2.4.6. Caracterización fisicoquímica de los sustratos

Una vez preparadas las mezclas correspondientes a los cuatro tratamientos, se recolectó aproximadamente 1 kg de cada formulación. Las muestras fueron colocadas en bolsas

herméticas, debidamente codificadas y trasladadas al Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliares del Centro Experimental Yanayacu para su caracterización fisicoquímica.

- **Para la caracterización física** se determinaron la densidad aparente, porosidad total, capacidad de retención de agua y aireación. La densidad aparente se estimó mediante la relación entre la masa seca y el volumen del material; la porosidad total mediante saturación y drenaje; la capacidad de retención de agua mediante pesaje antes y después del riego; y la aireación a partir de la diferencia entre la porosidad total y la retención de agua.
- **Para la caracterización química** se determinó pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliares del INIA.

2.4.7. Mortalidad y manejo de datos

Durante el periodo experimental se realizó el seguimiento visual de las plántulas de *E. deglupta* Blume en cada tratamiento, registrándose mediante conteo directo los individuos muertos durante las evaluaciones. El tratamiento T4 presentó mortalidad total antes de completar los 90 días de evaluación, por lo que no se dispuso de observaciones correspondientes al momento final del experimento. En consecuencia, los análisis estadísticos finales de las variables de crecimiento e indicadores de calidad se realizaron únicamente con los tratamientos T1, T2 y T3, que mantuvieron plántulas vivas hasta la evaluación final.

2.4.8. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron organizados por tratamiento y repetición y sometidos inicialmente a un análisis descriptivo mediante medidas de tendencia central y dispersión. Para el análisis inferencial se consideró el tipo de sustrato como factor de estudio y la repetición como unidad experimental.

Previamente a la aplicación de las pruebas inferenciales, se verificó la normalidad de los residuos mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba de Levene, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Las variables que cumplieron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron analizadas

mediante un análisis de varianza (ANOVA) de un factor y, cuando se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$), se aplicó la prueba de comparación múltiple de Tukey (HSD). Para el número de hojas se aplicó una transformación de raíz cuadrada ($\sqrt{x}$) antes del análisis. Debido a la mortalidad total registrada en T4 antes de finalizar el periodo experimental, los análisis inferenciales finales se realizaron considerando únicamente T1, T2 y T3.

III. RESULTADOS

3.1. Respuesta del crecimiento post-repique de *E. deglupta* Blume en diferentes sustratos

Durante el periodo experimental se observaron diferencias en la respuesta de crecimiento de *E. deglupta* frente a las formulaciones de sustrato evaluadas. Para este análisis se consideraron la altura de planta, diámetro basal, número de hojas y área foliar.

3.1.1. Altura de planta

La altura de las plantas mostró una tendencia creciente durante el periodo de evaluación (Tabla 1, Figura 3). Durante las primeras semanas, las diferencias entre tratamientos fueron relativamente reducidas; sin embargo, a partir de aproximadamente los 45 días se observó una diferenciación progresiva en el crecimiento, particularmente en T2 y T3. Al finalizar los 90 días de evaluación, T2 presentó la mayor altura promedio (28.37 cm), seguido de T3 (26.05 cm) y T1 (20.70 cm. En términos relativos, T2 y T3 superaron a T1 en 37.1 % y 25.8 %, respectivamente.

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($F = 9.81$; $p = 0.0055$). La prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre T2 y T1 ($p = 0.0049$) y entre T3 y T1 ($p = 0.0355$), mientras que T2 y T3 no difirieron estadísticamente entre sí ($p = 0.4265$). Por tanto, aunque T2 alcanzó la mayor altura promedio, T2 y T3 presentaron una respuesta estadísticamente similar y superior a T1.

La diferencia numérica entre T2 y T1 fue de 7.67 cm, mientras que entre T3 y T1 fue de 5.35 cm. En términos relativos, T2 superó a T1 en aproximadamente 37.1 %, mientras que T3 presentó un incremento aproximado de 25.8 % respecto de T1.

El análisis de varianza mostró diferencias significativas entre tratamientos para la altura de planta ($F = 9.81$; $p = 0.0055$). La prueba de comparación múltiple de Tukey confirmó diferencias significativas entre T2 y T1 ($p = 0.0049$) y entre T3 y T1 ($p = 0.0355$), mientras que no se detectaron diferencias significativas entre T2 y T3 ($p = 0.4265$). En consecuencia, aunque T2 presentó la mayor media numérica, estadísticamente T2 y T3 pertenecieron al mismo grupo de respuesta y ambos superaron a T1.

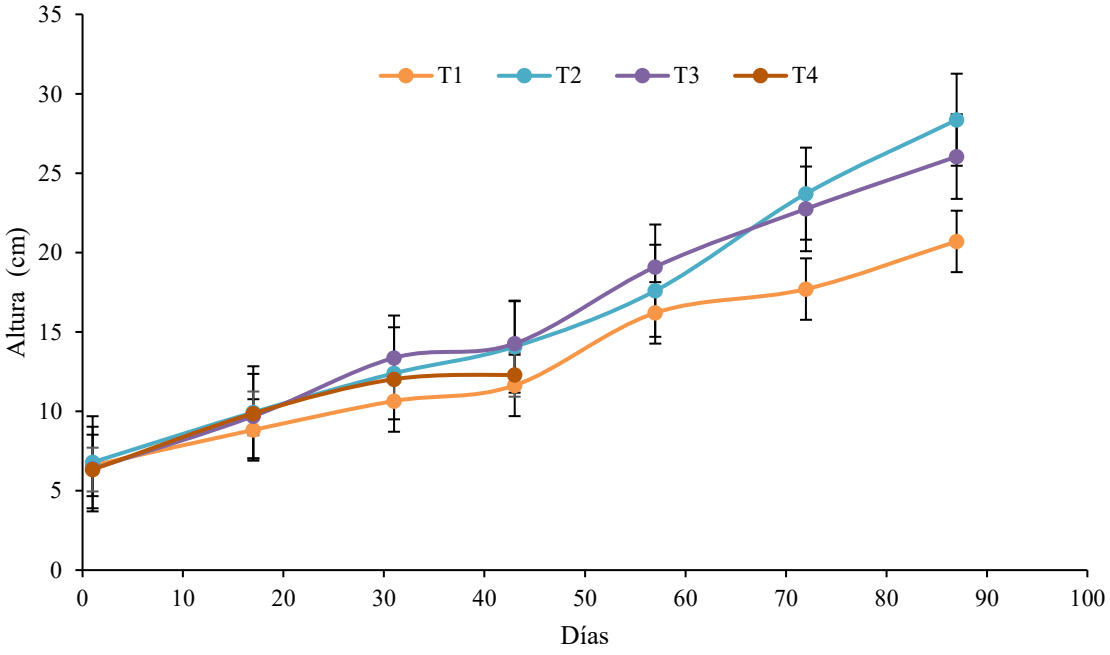
Tabla 1

Medias y desviación estándar de la altura por tratamiento y fecha de evaluación

Tratamiento	Día							Media (cm)	DE
	1	15	30	45	60	75	90		
T1	6.59	8.83	10.65	11.63	16.20	17.10	20.70	13.10	±5.03
T2	6.79	9.94	12.40	14.07	17.59	23.71	28.37	16.12	±7.67
T3	6.37	9.69	13.56	14.02	18.10	21.93	26.05	15.67	±6.86
T4	6.33	9.87	10.00	10.30	-	-	-	9.13	±1.87

Figura 3

Altura (cm) de E. deglupta durante los 90 días posteriores al repique en diferentes mezclas de sustratos



3.1.2. Diámetro basal

El diámetro basal de *E. deglupta* presentó un incremento progresivo durante el periodo de evaluación (Tabla 2, Figura 4). Durante las primeras evaluaciones, las diferencias entre los tratamientos fueron reducidas; sin embargo, estas se hicieron más evidentes a partir de aproximadamente los 30 días. Al finalizar los 90 días de evaluación, T2 presentó el mayor diámetro basal promedio, con 2,69 mm, seguido de T3 y T1.

El análisis de varianza evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($F = 11.43$; $p = 0.0034$). La prueba de comparación múltiple de Tukey mostró que T2 presentó un diámetro basal significativamente mayor que T1, con una diferencia media de 0.892 mm ($p = 0.0036$); asimismo, T3 presentó un diámetro significativamente mayor que T1, con una diferencia media de 0.703 mm ($p = 0.0150$). En contraste, no se encontraron diferencias significativas entre T2 y T3 ($p = 0.6150$). Por tanto, aunque T2 presentó el mayor diámetro basal promedio, su respuesta fue estadísticamente similar a la de T3; ambos tratamientos mostraron valores significativamente superiores a T1.

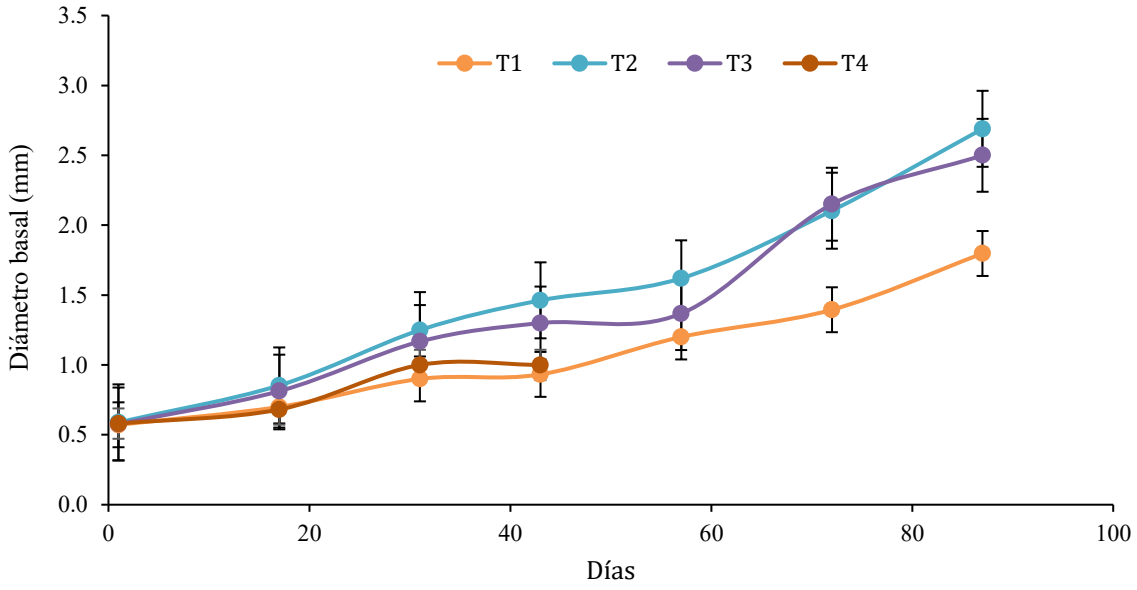
Tabla 2

Medias y desviación estándar del diámetro basal por tratamiento y fecha de evaluación

Tratamiento	Día							Media (mm)	DE
	1	15	30	45	60	75	90		
T1	0.57	0.70	0.90	0.92	1.19	1.40	1.80	1.07	±0.43
T2	0.59	0.85	1.25	1.46	1.62	2.10	2.69	1.51	±0.72
T3	0.58	0.81	1.10	1.23	1.39	1.98	2.50	1.37	±0.67
T4	0.58	0.68	1.00	1.00				0.82	±0.22

Figura 4

Diámetro basal (mm) de E. deglupta durante los 90 días posteriores al repique en diferentes mezclas de sustratos



3.1.3. Número de hojas

El número de hojas de *E. deglupta* presentó un comportamiento diferenciado entre tratamientos durante el periodo experimental (Tabla 3, Figura 5). Durante las primeras evaluaciones, los tratamientos mostraron valores relativamente similares; posteriormente, T3 presentó el mayor incremento, alcanzando aproximadamente 35 hojas alrededor de los 73 días y finalizando con aproximadamente 29 hojas. T2 mostró un incremento progresivo hasta alcanzar aproximadamente 24 hojas al final los 90 días, mientras que T1 presentó valores inferiores y un comportamiento más fluctuante durante el periodo de evaluación. Estos valores corresponden al comportamiento observado en la escala original de la variable.

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para el número de hojas ($p < 0.05$). La prueba de Tukey mostró que T2 y T3 presentaron un número de hojas significativamente superior a T1, mientras que entre T2 y T3 no se detectaron diferencias estadísticamente significativas.

Estos resultados indican que tanto T2 como T3 presentaron un número de hojas significativamente superior a T1 al momento de la evaluación estadística final, aunque T3 presentó la mayor media numérica para esta variable.

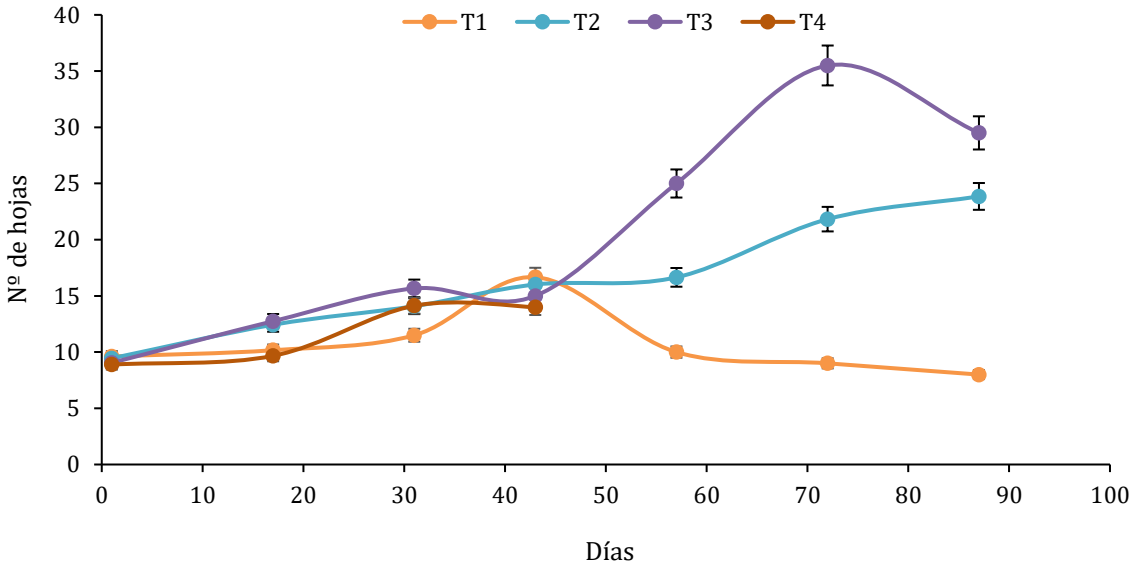
Tabla 3

Medias y desviación estándar de numero de hojas por tratamiento y fecha de evaluación

Tratamiento	Día							Media	DE
	1	15	30	45	60	75	90		
T1	9.61	10.17	11.50	17.50	10.25	8.75	7.50	10.75	±3.23
T2	9.45	12.43	14.08	16.01	16.65	21.83	23.85	16.33	±5.07
T3	9.05	12.75	15.25	14.75	25.75	34.25	29.50	20.19	±9.56
T4	8.89	9.67	14.13	14.00				11.67	±2.78

Figura 5

Número de hojas de E. deglupta durante los 90 días posteriores al repique en diferentes mezclas de sustratos



3.1.4. Área foliar

El área foliar de *E. deglupta* presentó valores promedio de 244.51 cm^2 para T1, 312.99 cm^2 para T2 y 295.36 cm^2 para T3. Aunque T2 registró el mayor valor promedio, seguido de T3 y T1, las diferencias numéricas observadas no fueron estadísticamente significativas (Tabla 4, Figura 6). Sin embargo, el análisis de varianza confirmó la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($F = 0.70$; $p = 0.522$). Asimismo, la

prueba de Tukey confirmó la ausencia de diferencias significativas entre T2 y T1 (p = 0.516), T3 y T1 (p = 0.686) ni entre T2 y T3 (p = 0.954). En consecuencia, bajo las condiciones evaluadas, los tratamientos presentaron un comportamiento estadísticamente similar para el área foliar, aun cuando T2 alcanzó el mayor valor promedio.

Tabla 4

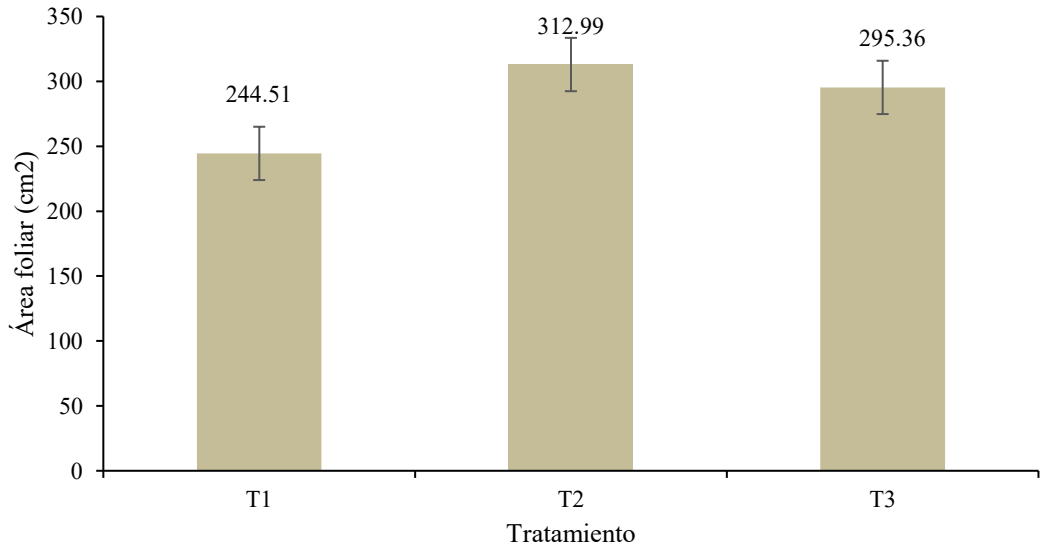
Media y desviación estándar del área foliar por tratamiento

Tratamiento	Media (cm²)	DE	Duncan (α = 0.05)
T1	313.85	±71.75	a
T2	312.99	±132.60	a
T3	312.02	±18.27	a

Nota: Tratamientos no presentan diferencias estadísticamente significativas

Figura 6

Área foliar (cm²) de E. deglupta en diferentes mezclas de sustratos



3.2. Influencia de los sustratos en el desarrollo morfológico de *E. deglupta* en diferentes sustratos

Para la evaluación estadística de los indicadores determinados al final del periodo experimental se consideraron T1, T2 y T3, debido a que T4 presentó mortalidad completa

antes de la evaluación final. Los registros correspondientes a T4 se conservaron para describir su comportamiento durante el periodo en que se dispuso de plantas vivas.

3.2.1. Índice crítico de clorofila

El índice crítico de clorofila presentó diferencias entre los tratamientos (Figura 7). Las medias registradas fueron 32.13 para T1, 44.87 para T2 y 35.62 para T3. En T4 se observó una disminución progresiva durante las evaluaciones disponibles, alcanzando un valor de 15.29 en la tercera evaluación.

El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas entre tratamientos ($F = 57.26$; $p < 0.0001$). La prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre T2 y T1 ($p < 0.0001$), T3 y T1 ($p = 0.0469$) y T2 y T3 ($p = 0.0001$).

Por tanto, T2 presentó el mayor valor promedio de índice crítico de clorofila y se diferenció estadísticamente de T1 y T3.

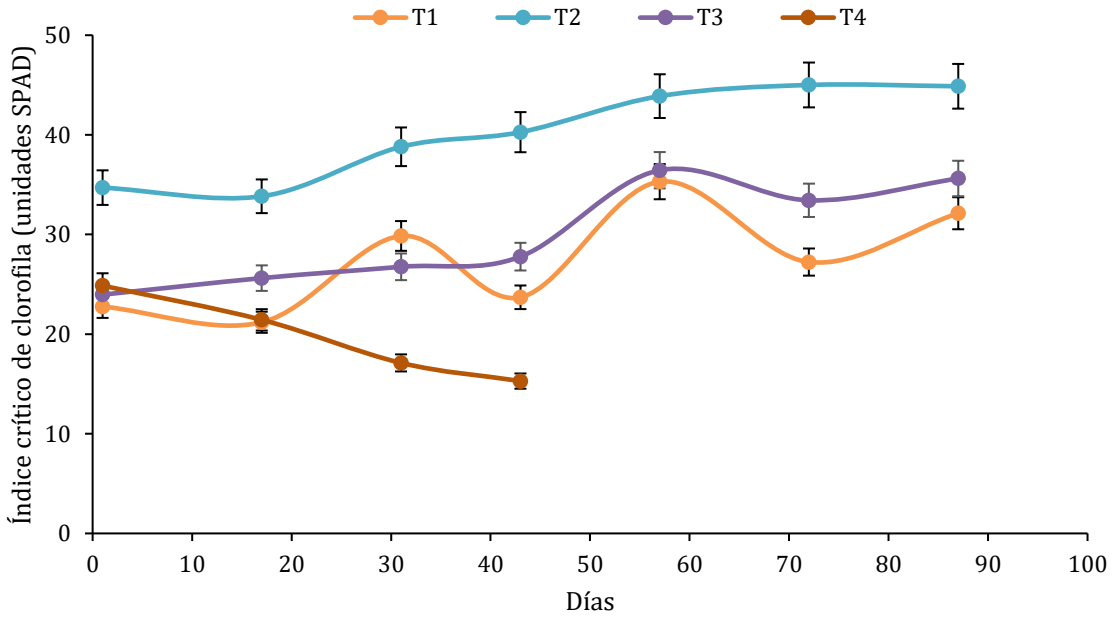
Tabla 5

Media y desviación estándar del índice critico de clorofila (SPAD) por tratamiento y fecha de evaluación

Tratamiento	Día						
	1	15	30	45	60	75	90
T1	22.77 ± 2.57	21.19 ± 6.10	29.85 ± 9.47	23.70 ± 8.50	35.30 ± 4.98	27.23 ± 3.69	32.13 ± 1.40
T2	34.70 ± 1.07	33.84 ± 4.07	38.80 ± 2.68	40.27 ± 1.52	43.89 ± 3.28	45.01 ± 2.22	44.87 ± 2.06
T3	23.96 ± 3.37	25.62 ± 6.93	26.76 ± 7.80	27.78 ± 10.84	36.45 ± 7.21	33.43 ± 5.57	35.62 ± 1.70
T4	24.87 ± 2.23	21.43 ± 4.45	17.11 ± 6.42	15.29 ± 5.05	—	—	—

Figura 7

Índice crítico de clorofila (unidades SPAD) de E. deglupta en diferentes mezclas de sustratos



3.2.2. Biomasa húmeda

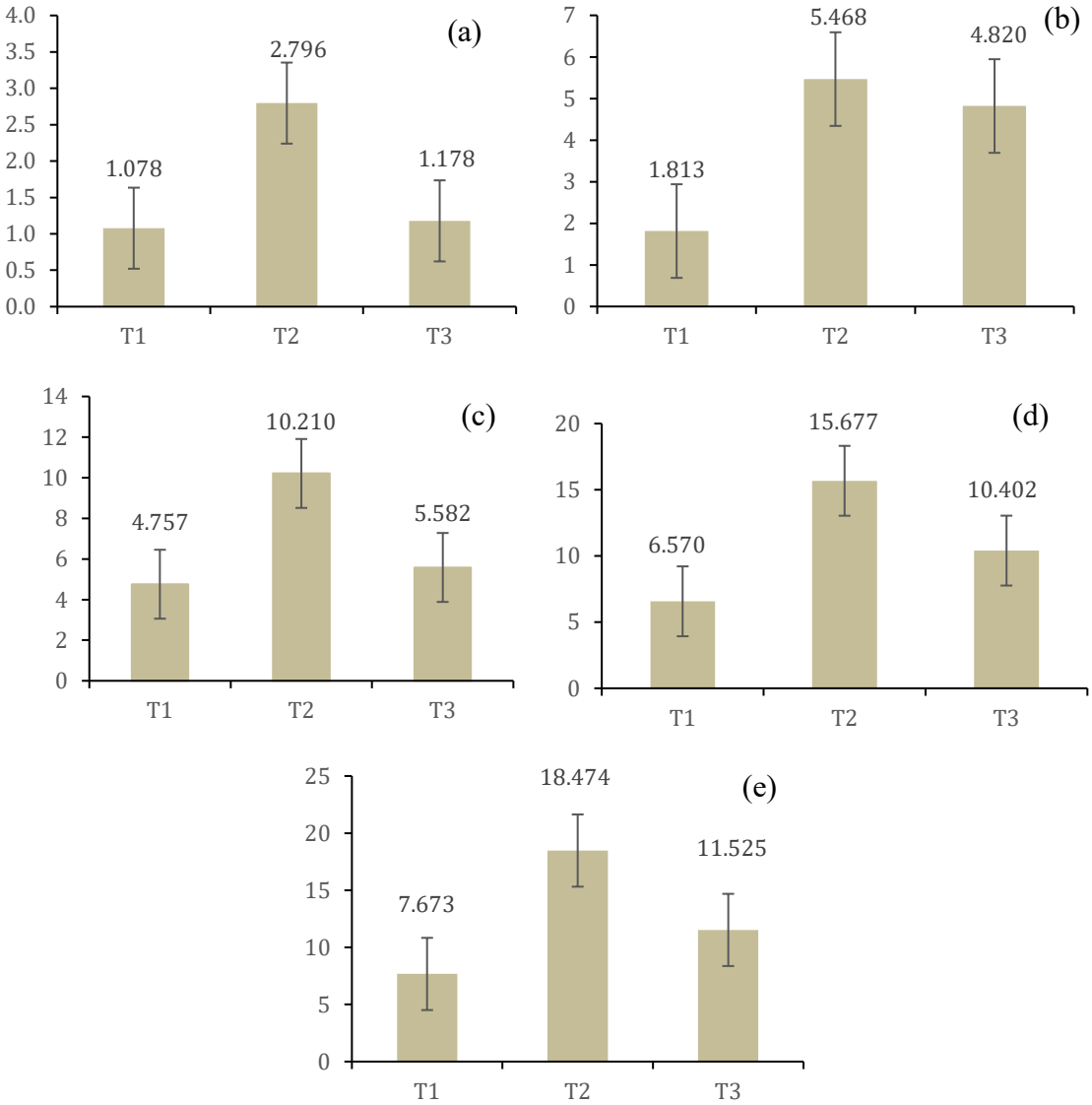
La acumulación de biomasa húmeda mostró una respuesta diferenciada entre tratamientos. T2 presentó los mayores valores en los componentes radicular, tallo, hojas, biomasa aérea y biomasa húmeda total, seguido de T3, mientras que T1 registró los menores valores. Los valores representados para la biomasa húmeda total fueron aproximadamente 7.74 g para T, 18.47 g para T2 y 11.58 g para T3.

El análisis de varianza mostró diferencias significativas para la biomasa húmeda total ($F = 6.07$; $p = 0.0215$). La prueba de Tukey identificó una diferencia significativa entre T2 y T1 ($p = 0.0184$), mientras que las comparaciones T3-T1 ($p = 0.4664$) y T3-T2 ($p = 0.1232$) no fueron significativas.

En consecuencia, la evidencia estadística indica que T2 presentó una biomasa húmeda total significativamente superior a T1, mientras que T3 presentó una respuesta intermedia que no se diferenció estadísticamente de los otros tratamientos.

Figura 8

Biomasa húmeda (g) de E. deglupta en diferentes mezclas de sustratos



Nota: Biomasa húmeda radicular (a), Biomasa húmeda de tallo (b), Biomasa húmeda de hojas (c), Biomasa húmeda aérea (d) y biomasa húmeda total (e).

3.2.3. Biomasa seca

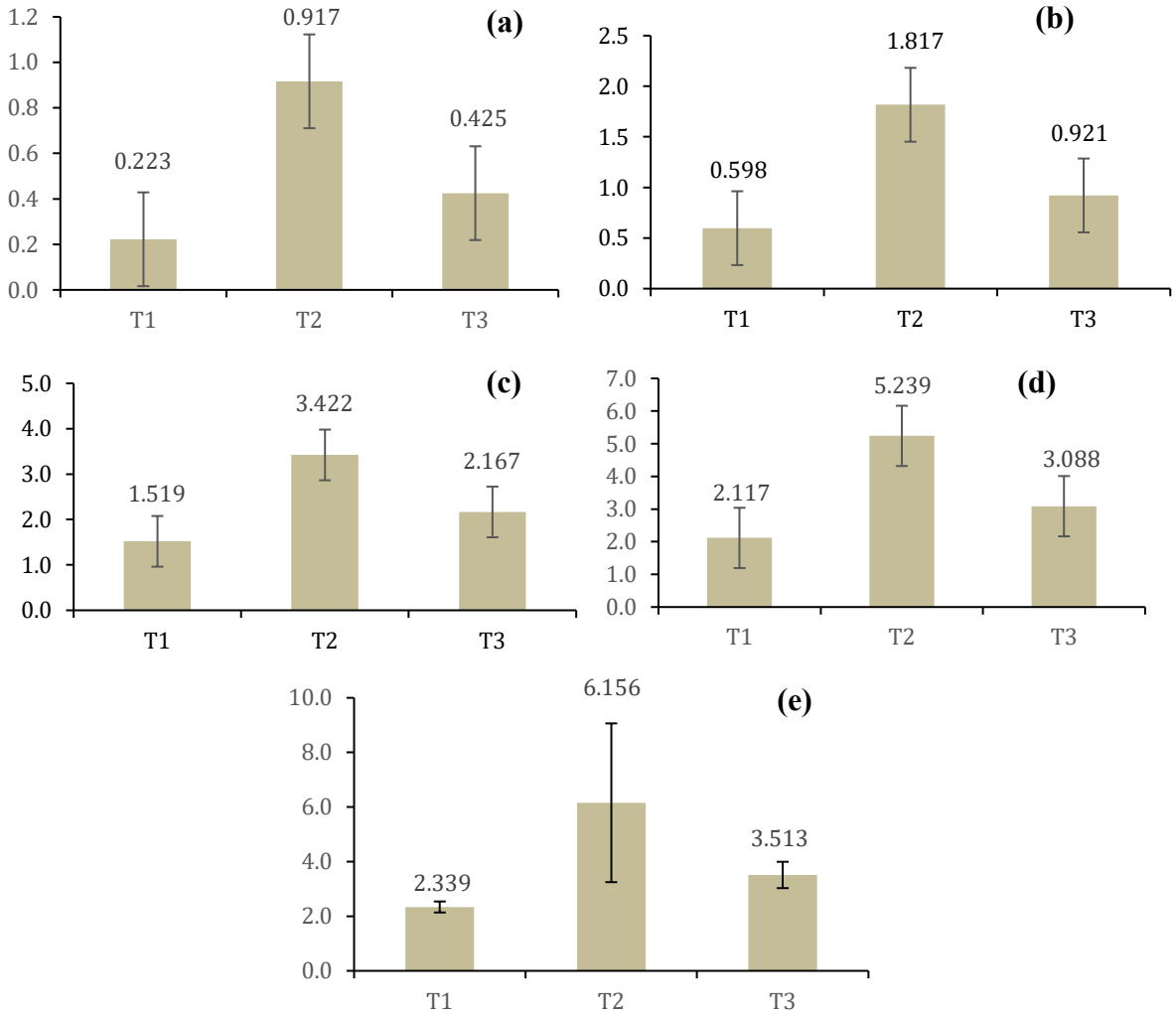
La biomasa seca presentó una tendencia similar a la observada para la biomasa húmeda (Figura 9). T2 registró los mayores valores en los componentes radicular, tallo, hojas, biomasa aérea y biomasa seca total, seguido de T3 y T1. Para la biomasa seca total, los valores promedio fueron aproximadamente 2.35 g en T1, 6.16 g en T2 y 3.51 g en T3.

El ANOVA mostró diferencias significativas entre tratamientos para la biomasa seca total

(F = 5.24; p = 0.0310). La prueba de Tukey evidenció una diferencia significativa entre T2 y T1 (p = 0.0282), mientras que las comparaciones T3-T1 (p = 0.6150) y T3-T2 (p = 0.1259) no fueron significativas. Por tanto, T2 presentó una acumulación de biomasa seca significativamente superior a T1, mientras que T3 mostró un comportamiento intermedio sin diferencias estadísticas respecto de T1 o T2.

Figura 9

Biomasa seca (g) de E. deglupta en diferentes mezclas de sustratos.



Nota: Biomasa seca radicular (a), Biomasa seca del tallo (b), Biomasa seca de hojas (c), Biomasa seca aérea (d) y Biomasa seca total (e).

3.2.4. Índice de lignificación

Presentó valores promedio de 31.03 % en T1, 32.66 % en T2 y 30.17 % en T3 (Figura 10). Aunque T2 presentó el mayor valor, seguido de T1 y T3, las diferencias entre tratamientos no fueron estadísticamente significativas. El análisis de varianza mostró un valor de $F = 3.62$ y $p = 0.0704$, superior al nivel de significancia de 0.05. Asimismo, ninguna de las comparaciones mediante Tukey presentó diferencias significativas: T2-T1 ($p = 0.2468$), T3-T1 ($p = 0.6430$) y T3-T2 ($p = 0.0626$).

En consecuencia, no existe evidencia estadística suficiente para afirmar que las formulaciones de sustrato modificaron el índice de lignificación bajo las condiciones evaluadas, por tanto, la diferencia numérica observada a favor de T2 debe interpretarse únicamente como una tendencia descriptiva y no como un efecto estadísticamente demostrado.

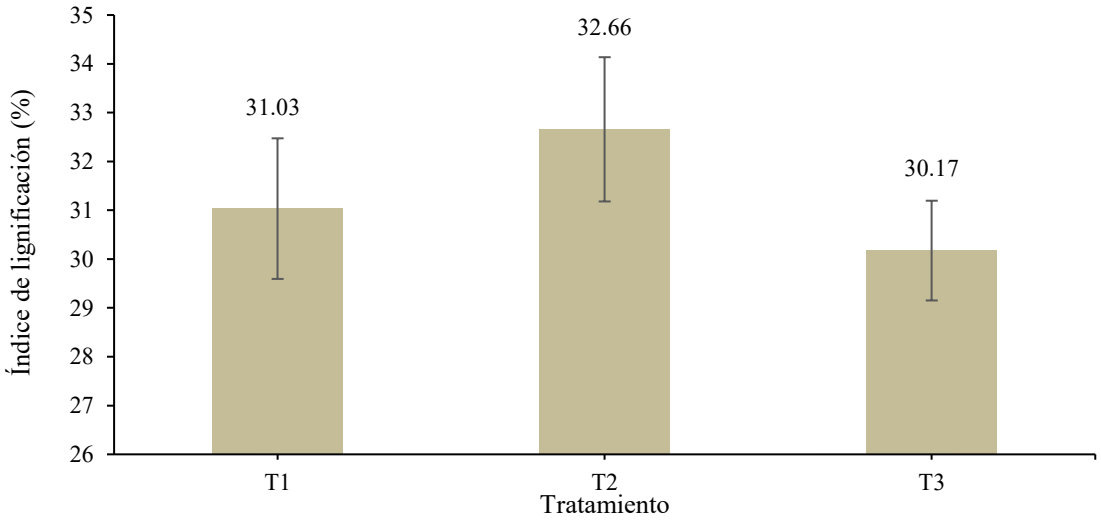
Tabla 6

Media y desviación estándar del índice de lignificación por tratamiento

Tratamiento	Media	DE
T1	30.39	±2.431
T2	32.66	±1.478
T3	30.17	±1.022

Figura 10

Índice de lignificación de E. deglupta en diferentes mezclas de sustratos



3.2.5. Índice de robustez

El índice de robustez presentó valores promedio de 11.38 en T1, 10.76 en T2 y 10.47 en T3. T1 presentó el mayor valor numérico y T3 el menor (Figura 11).

El análisis de varianza no detectó diferencias significativas entre tratamientos ($F = 1.42$; $p = 0.2902$). La prueba de Tukey tampoco identificó diferencias significativas en ninguna de las comparaciones: T2-T1 ($p = 0.5255$), T3-T1 ($p = 0.2743$) y T3-T2 ($p = 0.8582$).

De acuerdo con el criterio de clasificación empleado en el estudio, los tres tratamientos presentaron valores superiores al umbral establecido para una condición de baja calidad morfológica. En consecuencia, aunque T3 presentó el menor índice de robustez numéricamente, no se puede afirmar que el tratamiento haya producido una mejora estadísticamente significativa en este indicador.

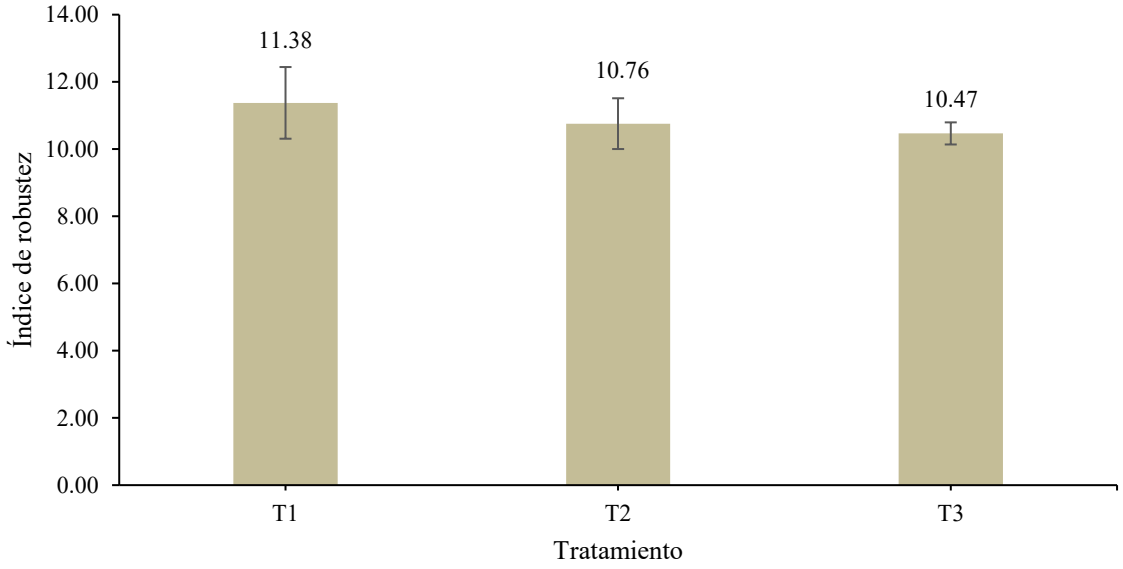
Tabla 7

Media y desviación estándar del índice de robustez por tratamiento

Tratamiento	Media	DE
T1	11.38	±1.067
T2	10.76	±0.755
T3	10.47	±0.329

Figura 11

Índice de robustez de E. deglupta en diferentes mezclas de sustratos



3.2.6. Índice de Calidad de Dickson

El Índice de Calidad de Dickson presentó valores promedio de 0.110 para T1, 0.376 para T2 y 0.124 para T3. T2 presentó el mayor valor y fue seguido por T3 y T1 (Figura 12).

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($F = 9,12$; $p = 0.0068$). La prueba de Tukey confirmó diferencias significativas entre T2 y T1 (diferencia de medias = 0.27; $p = 0.0103$) y entre T2 y T3 (diferencia de medias = 0.25; $p = 0.0150$). En contraste, T3 y T1 no presentaron diferencias significativas ($p = 0.9663$).

Estos resultados indican que T2 presentó un Índice de Calidad de Dickson significativamente superior a T1 y T3. De acuerdo con los intervalos de clasificación empleados en el estudio, el valor obtenido en T2 se ubicó dentro de la categoría de calidad media, mientras que T1 y T3 se ubicaron en la categoría de calidad baja.

En consecuencia, entre los tratamientos que llegaron a la evaluación final, T2 presentó el mayor valor del indicador integral de calidad de planta.

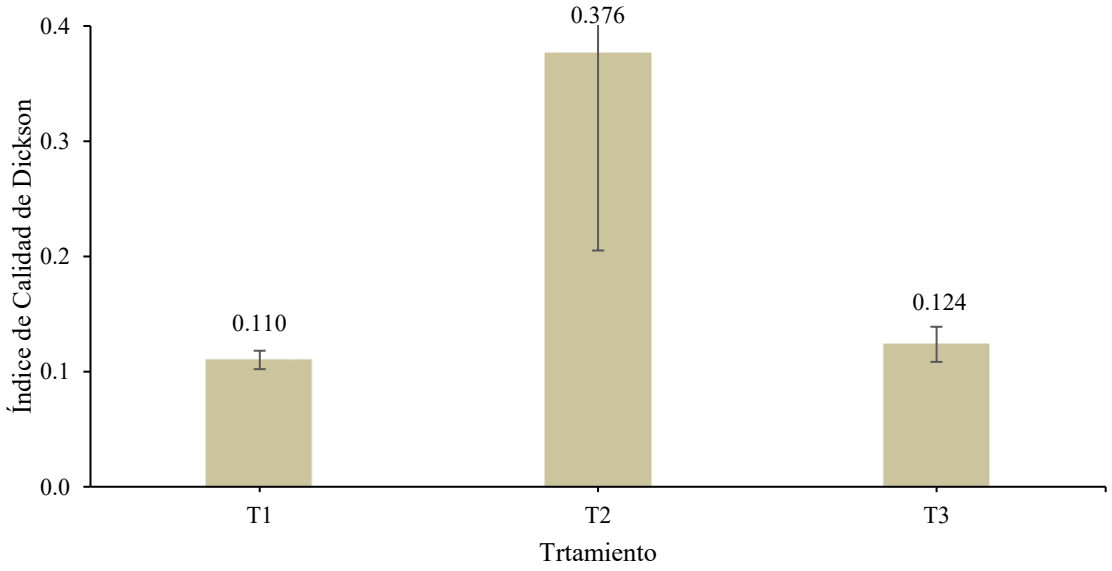
Tabla 8

Media y desviación estándar del índice de Calidad de Dickson por tratamiento

Tratamiento	Media	DE
T1	0.11	±0.005
T2	0.38	±0.171
T3	0.12	±0.015

Figura 12

Índice de Calidad de Dickson de E. deglupta en diferentes mezclas de sustratos



3.3. Características físicas y químicas de los diferentes sustratos

3.3.1. Caracterización física de las mezclas de sustratos

La caracterización física mostró diferencias entre las formulaciones evaluadas. La densidad aparente fue de 0.520 g cm^{-3} en T1, 0.750 g cm^{-3} en T2, 0.560 g cm^{-3} en T3 y 0.679 g cm^{-3} en T4. La porosidad total alcanzó 49.09 % en T1, 68.79 % en T2, 42.11 % en T3 y 47.22 % en T4. La capacidad de retención de agua fue de 94.23 %, 91.67 %, 74.14 % y 69.51 % para T1, T2, T3 y T4, respectivamente. La aireación correspondió a 45.14 %, 22.90 %, 32.03 % y 22,29 %, respectivamente.

T2 presentó la mayor porosidad total y una elevada capacidad de retención de agua, mientras que T1 presentó la mayor capacidad de retención de agua y aireación. T3 y T4 presentaron menores valores de capacidad de retención de agua respecto de T1 y T2.

Debido a que la caracterización presentada corresponde a una muestra por formulación, estos resultados deben considerarse descriptivos. No corresponde realizar inferencias estadísticas entre tratamientos para estas propiedades si no se dispuso de réplicas analíticas independientes.

Tabla 9

Propiedades físicas de las mezclas de sustratos evaluadas.

Tratamiento	Densidad aparente (g cm^{-3})	Porosidad total (%)	Capacidad de retención de agua (%)	Aireación (%)
T1	0.520	49.09	94.23	45.14
T2	0.750	68.79	91.67	22.90
T3	0.560	42.11	74.14	32.03
T4	0.679	47.22	69.51	22.29

3.3.2. Caracterización química de las mezclas de sustratos

Las formulaciones mostraron diferencias en sus propiedades químicas. T1 presentó 1.8 % de materia orgánica, 0.9 mg g^{-1} de nitrógeno, 740 mg kg^{-1} de fósforo, 103.19 mg kg^{-1} de potasio, pH 8.0 y conductividad eléctrica de 92.5. T2 presentó 0.9 % de materia orgánica, 0.45 mg g^{-1} de nitrógeno, 377.39 mg kg^{-1} de fósforo, 36.39 mg kg^{-1} de potasio, pH 7.5 y conductividad eléctrica de 44.8. T3 registró 1.1 % de materia orgánica, 0.55 mg g^{-1} de nitrógeno, 739.39 mg kg^{-1} de fósforo, 114.25 mg kg^{-1} de potasio, pH 8.7 y conductividad eléctrica de 68.0. Finalmente, T4 presentó los valores más elevados de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, con 6.9 %, 3.45 mg g^{-1}, 767.79 mg kg^{-1} y 150.99 mg $kg^{-1.}$ respectivamente, además de pH 7.8 y conductividad eléctrica de 132.5.

La formulación T2 presentó el menor valor de conductividad eléctrica entre los tratamientos evaluados, mientras que T4 presentó el valor más elevado. Asimismo, se observaron diferencias en la textura reportada para las mezclas, desde franco arenosa hasta franco arcilloso arenosa.

Tabla 10

Propiedades químicas de las mezclas de sustratos evaluadas

Tratamiento	Materia orgánica (%)	Nitrógeno (mg g^{-1})	Fósforo (mg kg^{-1})	Potasio (mg kg^{-1})	pH	Conductividad eléctrica (mS/m)	Textura
T1	1.8	0.9	740.00	103.19	8.0	92.50	franco arenoso
T2	0.9	0.45	377.39	36.39	7.5	44.80	franco arenoso
T3	1.1	0.55	739.39	114.25	8.7	68.00	arena franca
T4	6.9	3.45	767.79	150.99	7.8	132.50	franco arcilloso arenosa

3.4. Mortalidad y comportamiento del tratamiento T4

El tratamiento T4 presentó mortalidad progresiva durante el periodo experimental. En las primeras evaluaciones se registraron plantas vivas y crecimiento; sin embargo, posteriormente disminuyó el número de individuos sobrevivientes hasta alcanzar la mortalidad total antes de completar los 90 días de evaluación. Los últimos registros disponibles para este tratamiento correspondieron aproximadamente a los 45 días.

Debido a la mortalidad total registrada, T4 no contó con observaciones en la evaluación final y, por tanto, no fue incluido en los análisis inferenciales de las variables de crecimiento e indicadores de calidad realizados al término del experimento. No obstante, los registros obtenidos durante el periodo en que las plantas permanecieron vivas fueron considerados para describir su comportamiento.

IV. DISCUSIÓN

Las mezclas de sustratos generaron respuestas diferenciadas en el crecimiento post-repique de *E. deglupta*. A los 90 días, T2 alcanzó la mayor altura promedio (28.37 cm) y el mayor diámetro basal (2.69 mm), mientras que T3 registró 26,05 cm de altura y presentó un comportamiento estadísticamente similar a T2 para ambas variables. T2 superó numéricamente a T1 en altura en 7.67 cm (37.1 %). Las diferencias entre tratamientos fueron significativas tanto para altura ($p = 0.0055$) como para diámetro basal ($p = 0.0034$), aunque T2 y T3 no difirieron estadísticamente entre sí. Estos resultados son comparables con Hurtado et al., (2023), quienes registraron en *E. deglupta* 15.73 cm de altura y 2.41 mm de diámetro a los 60 días con el tratamiento de mayor respuesta; asimismo, Missio et al. (2024) encontraron respuestas diferenciadas en supervivencia y desarrollo radicular de la misma especie según el sustrato utilizado. Aunque las condiciones experimentales fueron diferentes, estos estudios coinciden en evidenciar una respuesta diferenciada de *E. deglupta* frente a las condiciones proporcionadas durante su producción en vivero (Hurtado et al., 2023; Missio et al., 2024).

En el desarrollo foliar, T3 presentó la mayor media numérica al finalizar la evaluación (≈29 hojas), seguido de T2 (≈24 hojas); ambos tratamientos fueron estadísticamente superiores a T1 ($p = 0.0004$), pero no difirieron significativamente entre sí. Estos valores son próximos a las 22.3 hojas por planta reportadas por Hurtado et al. (2023) para *E. deglupta*, aunque dicha investigación realizó la evaluación a los 60 días. En contraste, el área foliar alcanzó 244.51 cm^2 en T1, 312.99 cm^2 en T2 y 295.36 cm^2 en T3, sin diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.522$). Por tanto, el mayor número de hojas no estuvo necesariamente acompañado de diferencias estadísticas en el área foliar. Esta respuesta respalda la necesidad de evaluar conjuntamente distintos atributos, debido a que una característica aislada no representa integralmente la calidad de las plantas forestales (Grossnickle & MacDonald, 2018; Lamhamedi et al., 2023).

Las propiedades físicas de los sustratos complementan la interpretación de las diferencias observadas. T2 presentó la mayor porosidad total (68.79 %), una capacidad de retención de agua de 91.67 % y aireación de 22.90 %, mientras que T1 registró 49.09 % de porosidad

total, 94.23 % de retención de agua y 45.14 % de aireación. T3 y T4 presentaron capacidades de retención de agua de 74.14 % y 69.51 %, respectivamente. A pesar de la mayor retención de agua y aireación de T1, este tratamiento presentó menor crecimiento que T2 y T3, evidenciando que un valor elevado de una propiedad física individual no determina necesariamente una mejor respuesta. Boudreault et al. (2023) encontraron relaciones entre porosidad, aireación, propiedades hidráulicas y crecimiento de plántulas forestales; asimismo, Mariotti et al. (2023) destacan que el desempeño de los componentes de un sustrato depende de sus propiedades, de la especie y de las condiciones particulares de producción. En consecuencia, la respuesta favorable de T2 debe interpretarse en función del comportamiento conjunto de la formulación y no de una propiedad física aislada (Boudreault et al., 2023; Mariotti et al., 2023).

En cuanto al estado fisiológico y la acumulación de biomasa, T2 presentó el mayor contenido relativo de clorofila (44.87 unidades SPAD), frente a 35.62 unidades SPAD en T3 y 32.13 unidades SPAD en T1, con diferencias altamente significativas entre tratamientos ($p < 0.0001$). Este comportamiento estuvo acompañado de una mayor acumulación de biomasa: la biomasa húmeda total alcanzó 18.47 g en T2, 11.58 g en T3 y 774 g en T1 ($p = 0.0215$), mientras que la biomasa seca total fue de 616 g, 3.51 g y 2.35 g, respectivamente ($p = 0.0310$). Resultados diferenciados en crecimiento y acumulación de biomasa según el sustrato también han sido reportados en especies de *Eucalyptus*. Stuepp et al. (2020), por ejemplo, registraron en *E. benthamii* hasta 1.68 g de biomasa seca aérea y 0.68 g de biomasa seca radical, asociados con 34.50 cm de altura y 3.59 mm de diámetro a los 120 días. Aunque las magnitudes no son directamente comparables debido a las diferencias de especie, formulación y periodo de evaluación, ambos estudios muestran que las condiciones del medio de crecimiento pueden modificar conjuntamente el crecimiento y la acumulación de biomasa, cuya distribución también responde a la disponibilidad de recursos y a las condiciones ambientales (Poorter et al., 2012; Stuepp et al., 2020).

Los indicadores de calidad mostraron respuestas diferentes según la variable analizada. El índice de lignificación alcanzó 31.03 % en T1, 32.66 % en T2 y 30.17 % en T3, sin diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.0704$); de manera similar, el índice de robustez fue de 11.38 en T1, 10.76 en T2 y 10.47 en T3, también sin diferencias significativas

(p = 0.2902). En contraste, el Índice de Calidad de Dickson presentó diferencias significativas (p = 0.0068), alcanzando 0.376 en T2, 0.124 en T3 y 0.110 en T1, siendo T2 significativamente superior a T1 y T3. Diferencias en el ICD asociadas con la composición del medio de crecimiento también han sido reportadas en plántulas de *Eucalyptus* (Sartori et al., 2023; Stuepp et al., 2020). Estos resultados evidencian que la respuesta favorable de una formulación no necesariamente se manifiesta de igual manera en todos los índices y respaldan la utilización conjunta de diferentes atributos para determinar la calidad de las plantas (Dickson et al., 1960; Grossnickle & MacDonald, 2018).

La respuesta de T3 merece particular atención, debido a que esta formulación estuvo constituida por 30 % de arena, 40 % de humus de lombriz y 30 % de biochar y presentó respuestas estadísticamente similares a T2 en altura, diámetro basal y número de hojas, aunque fue inferior a T2 en contenido relativo de clorofila e ICD. Asimismo, T3 presentó 42.11 % de porosidad total, 74.14 % de retención de agua y 32.03 % de aireación, además de 1.1 % de materia orgánica, 0.55 mg g^{-1} de N, 739.39 mg kg^{-1} de P, 114.25 mg kg^{-1} de K y pH 8.7. Estudios realizados con especies de *Eucalyptus* muestran igualmente que los materiales carbonizados pueden generar respuestas diferentes en altura, diámetro, biomasa e ICD dependiendo de su proporción, características y combinación con otros componentes (Mariotti et al., 2023; Sartori et al., 2023; Stuepp et al., 2020). Por ello, el desempeño de T3 no debe atribuirse exclusivamente a la presencia de 30 % de biochar, sino a las características resultantes de la formulación en su conjunto.

Por otro lado, T4 presentó los mayores contenidos de materia orgánica (6.9 %), N (3.45 mg g^{-1}), P (767.79 mg kg^{-1}) y K (150.99 mg kg^{-1}), además de un pH de 7.8 y la mayor conductividad eléctrica (132.5 mS/m); sin embargo, mostró mortalidad progresiva hasta la pérdida total de las plantas antes de la evaluación final. Este comportamiento evidencia que una mayor concentración de nutrientes no necesariamente se traduce en un mejor desempeño, debido a que la respuesta de las plantas depende de la interacción de las propiedades físicas y químicas del medio (Boudreault et al., 2023; Mariotti et al., 2023). En *E. deglupta*, Missio et al. (2024) también encontraron diferencias marcadas de supervivencia entre sustratos, registrando a los 30 días 15 estacas vivas en el sustrato comercial frente a cinco en la formulación alternativa, acompañadas de diferencias en el desarrollo radicular. Aunque dicho

estudio utilizó estacas y condiciones experimentales diferentes, ambos resultados evidencian respuestas diferenciadas de *E. deglupta* frente al medio de crecimiento. No obstante, la mortalidad registrada en T4 no puede atribuirse exclusivamente a la conductividad eléctrica, concentración de nutrientes u otra propiedad individual, debido a que la presente investigación no evaluó relaciones causales entre dichas características y la mortalidad.

En conjunto, T2 presentó la respuesta más favorable en diversos atributos, alcanzando la mayor altura (28.37 cm), diámetro basal (2.69 mm), área foliar (312.99 cm^2), contenido relativo de clorofila (44.87 unidades SPAD), biomasa húmeda total (18.47 g), biomasa seca total (6.16 g) e ICD (0.376); mientras que T2 y T3 fueron estadísticamente similares en altura, diámetro basal y número de hojas. Estos resultados evidencian que la selección de una formulación no debe sustentarse exclusivamente en una variable, sino en la valoración conjunta de atributos morfológicos, fisiológicos, de biomasa e indicadores de calidad (Grossnickle & MacDonald, 2018; Lamhamedi et al., 2023; Mariotti et al., 2023). Bajo las condiciones experimentales evaluadas, T2 presentó el desempeño integral más favorable para el crecimiento y calidad post-repique de *E. deglupta*; sin embargo, estos resultados corresponden a la fase de vivero y requieren validación posterior mediante la evaluación de la supervivencia y crecimiento de las plantas después de su establecimiento en campo.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Las mezclas de sustratos tuvieron un efecto diferenciado sobre el crecimiento post-repique de *E. deglupta*, con diferencias significativas en altura, diámetro basal y número de hojas, pero no en área foliar. T2 alcanzó la mayor altura (28.37 cm) y diámetro basal (2.69 mm), aunque presentó respuestas estadísticamente similares a T3 en estas variables.
- La calidad de las plantas también estuvo condicionada por la formulación del sustrato. T2 presentó el mejor desempeño integral, al alcanzar los mayores valores de clorofila (44.87 unidades SPAD), biomasa húmeda (18.47 g), biomasa seca (6.16 g) e ICD (0.376); mientras que el índice de lignificación y el índice de robustez no mostraron diferencias significativas.
- Las características fisicoquímicas variaron entre las formulaciones evaluadas; sin embargo, los resultados evidenciaron que una mayor concentración de nutrientes no garantiza, por sí sola, un mejor desempeño de las plantas. Esto se observó en el tratamiento T4, que presentó los mayores contenidos de materia orgánica, N, P y K, pero registró mortalidad total antes de finalizar el periodo experimental. Este comportamiento pone de manifiesto que la calidad de un sustrato no debe evaluarse únicamente por su riqueza nutricional, sino también por el equilibrio entre sus propiedades físicas y químicas, las cuales condicionan la disponibilidad de agua y nutrientes, la aireación y el desarrollo de las raíces; por tanto, un sustrato adecuado es aquel que proporciona condiciones equilibradas para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y no necesariamente el que contiene las mayores concentraciones de nutrientes.
- T2 fue la formulación con el desempeño integral más favorable para el crecimiento y desarrollo morfológico post-repique de *E. deglupta* bajo las condiciones de vivero evaluadas, al presentar una respuesta favorable conjunta en los atributos morfológicos, fisiológicos, de biomasa y calidad.

5.2. Recomendaciones

- A investigadores y universidades, evaluar el desempeño de T2 en condiciones de campo, considerando la supervivencia, crecimiento y calidad de *E. deglupta* a mediano y largo plazo, con la finalidad de validar los resultados obtenidos en vivero.
- A instituciones vinculadas con la producción forestal, considerar T2 como formulación de referencia para nuevos ensayos de producción de *E. deglupta*, evaluando además su viabilidad técnica y económica antes de promover su aplicación a mayor escala.
- A universidades, centros de investigación, municipalidades y entidades vinculadas con programas de reforestación, desarrollar investigaciones sobre formulaciones de sustratos que incorporen materiales orgánicos y biochar disponibles localmente, orientadas a mejorar la calidad de las plantas y promover el aprovechamiento sostenible de residuos.
- A investigadores y centros de investigación, evaluar integralmente las propiedades físicas y químicas de los sustratos, considerando tanto la disponibilidad de nutrientes como la porosidad, aireación, drenaje y capacidad de retención de agua, con la finalidad de identificar formulaciones equilibradas que favorezcan el crecimiento y desarrollo de las plantas, evitando considerar la concentración de nutrientes como único criterio para determinar la calidad de un sustrato.

VI. REFERENCIAS

Amaringo-Cordova, L. P., Mori-Montero, C., Padilla-Castro, C. F., Ocaña-Reyes, J. A., Riveros-Lizana, C. A., Camacho-Villalobos, A. A., & Solórzano-Acosta, R. (2025). Native microbial consortia: A sustainable strategy for improving the quality of forest seedlings in the Peruvian Amazon. Forests, 16(2), 309. https://doi.org/10.3390/f16020309

Atalaya-Marin, N., Sanchez-Fuentes, T., Goñas, M., Tineo, D., Taboada-Mitma, V. H., Cabrera-Hoyos, H., Cruz-Luis, J. C., Ganoza-Roncal, J. J., & Gómez-Fernández, D. (2025). Estimation of aboveground biomass and carbon sequestration in a cocoa agroforestry system using UAV-LiDAR in northwestern Peru. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 40. 101750. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101750

Barrantes, M., Cerdas, M., Chinchilla, C. (2018). Evaluación de contenido de clorofila y nitrógeno foliar en plátano (Musa AAB) mediante el uso del medidor SPAD-502. Agronomía Mesoamericana, 29(2), 329-343. https://doi.org/10.15517/am.v29i2.33000

Boudreault, S., Caron, J., Lamhamedi, M. S., & Pepin, S. (2023). Comparison of hydraulic and aeration properties of peat substrates used to produce containerized white spruce seedlings in forest nurseries. Forests, 14(4), 858. https://doi.org/10.3390/f14040858

Chuquibala-Checan, B., Cruz-Malca, J. M., Cubas Sanchez, J. A., Arce-Inga, M., Taboada-Mitma, V. H., Gómez-Fernández, D., Tafur-Culqui, J., Goñas, M., & Tineo, D. (2026). Influence of root inducers and substrates on the vegetative propagation of pitahaya species (Hylocereus spp.) under nursery conditions. Scientific Reports. https://doi.org/10.1038/s41598-026-60049-0

Cornelissen, J. H., Lavorel, S., Garnier, E., Díaz, S., Buchmann, N., Gurvich, D. E., Poorter, H. (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. Australian Journal of Botany, 51(4), 335-380. https://doi.org/10.1071/BT02124

Cubas, J. A., Chuquibala-Checan, B., Atalaya-Marin, N., Tineo, D., Taboada-Mitma, V. H., Cabrera-Hoyos, H., Cruz-Luis, J., Goñas, M., & Gómez-Fernández, D. (2026). Modeling the potential distribution of Musa (AAB), cv. 'Bellaco' and Carica papaya under climate change scenarios in the provinces of Jaén and San Ignacio. Smart Agricultural Technology, 14. https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.102271

Dickson, A., Leaf, A. L., & Hosner, J. F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. The Forestry Chronicle, 36(1), 10-13. https://doi.org/10.5558/tfc36010-1

Dixit, A., & Burney, O. (2024). Nursery cultural practices influence morphological and physiological aspen seedling traits: Implications for post-fire restoration. Canadian Journal of Forest Research, 54(10), 1076–1084. https://doi.org/10.1139/cjfr-2024-0031

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). The state of the world's forests 2022: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. FAO. https://doi.org/10.4060/cb9360en

García, E, Hurtado, Y. H., Chico, J. R., Campos, J., Cerna, L., & Campos, S. N. (2023). Efecto de los fertilizantes fosforados y nitrogenados en el crecimiento de Eucalyptus deglupta Blume (Myrtaceae). Arnaldoa, 30(2), 169-192. https://doi.org/10.22497/arnaldoa.302.30206

Grossnickle, S. C., & MacDonald, J. E. (2018). Seedling quality: History, application, and plant attributes. Forests, 9(5), 283. https://doi.org/10.3390/f9050283

Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2024, 6 de marzo). MIDAGRI implementa moderno Laboratorio de Suelos, Aguas y Foliares para impulsar la agricultura en Jaén y San Ignacio. Gobierno del Perú. https://www.gob.pe/institucion/inia/noticias/916417-midagri-implementa-moderno-laboratorio-de-suelos-aguas-y-foliares-para-impulsar-la-agricultura-en-jaen-y-san-ignacio

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report

of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H. Lee & J. Romero, Eds.). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Lambers, H., Chapin, F. S., Pons, T. L. (2008). Plant physiological ecology (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3

Lamhamedi, M. S., Pepin, S., & Khasa, D. (2023). The production chain of tree seedlings, from seeds to sustainable plantations: An essential link for the success of reforestation and restoration programs in the context of climate change. Forests, 14(9), 1693. https://doi.org/10.3390/f14091693

Ling, Q., Huang, W., Jarvis, P. (2011). Use of a SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in Arabidopsis thaliana. Photosynthesis Research, 107(2), 209-214. https://doi.org/10.1007/s11120-010-9606-0

Mariotti, B., Oliet, J. A., Andivia, E., Tsakaldimi, M., Villar-Salvador, P., Ivetić, V., et al. (2023). A Global Review on Innovative, Sustainable, and Effective Materials Composing Growing Media for Forest Seedling Production. Current Forestry Reports, 9, 413-428. https://doi.org/10.1007/s40725-023-00204-2

Mataruga, M., Cvjetković, B., De Cuyper, B., Aneva, I., Zhelev, P., Cudlín, P., Metslaid, M., Kankaanhuhta, V., Collet, C., Annighöfer, P., Mathes, T., Tsakaldimi, M., Paitaridou, D., Jónsdóttir, R. J., Monteverdi, M. C., de Dato, G., Mariotti, B., Kolevska, D. 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

Missio, F. F., Lima, E. S., & Machineski, G. S. (2024). Sobrevivência e desenvolvimento radicular em estacas da espécie comercial Eucalyptus deglupta Blume sob diferentes substratos. Observatório de la Economía Latinoamericana, 22(9), e6743. https://doi.org/10.55905/oelv22n9-122

Muñoz, H. J., Sáenz, J. T., Coria, V. M., García, J. de J., Hernández, J., & Manzanilla, G. E. (2015). Calidad de planta en el vivero forestal La Dieta, municipio Zitácuaro, Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 6(27), 72–89. https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i27.282

Novikov, A. I., Rabko, S. U., Novikova, T. P., & Petrishchev, E. P. (2023). Dickson Quality Index: Relation to technological impact on forest seeds. *Forestry Engineering Journal, 13*(1), 23–36. https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.1/2

Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de muestreo sobre una población a estudio. International Journal of Morphology, 35(1), 227–232. https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037

Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., Oleksyn, J., Poot, P., & Mommer, L. (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. New Phytologist, 193(1), 30-50. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x

Rasband, W. S. (2012). ImageJ user guide. National Institutes of Health. https://imagej.net/ij/docs/guide/user-guide.pdf

Sartori, A. F., Passos, R. R., Gonçalves, E. de O., Rangel, O. J. P., Burak, D. L., Santos, D. A., & Machado, L. C. (2023). Biochar from eucalyptus biomass and the quality of seedlings. Contribuciones a las Ciencias Sociales, 16(12), 29578–29595. https://doi.org/10.55905/revconv.16n.12-035

Stahl, J. L., Araujo, M. M., Griebeler, A. M., Turchetto, F., & Correa, U. O. dos S. (2022). The water-retaining polymer improves the seedlings quality of native forest species in a nursery. *Bosque, 43*(1). https://doi.org/10.4067/S0717-92002022000100033

Stuepp, C. A., Kratz, D., Gabira, M. M., & Wendling, I. (2020). Survival and initial growth in the field of eucalyptus seedlings produced in different substrates. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 55, e01587. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01587

Tinoco, J., & Ramírez, O. (2014). Evaluación de la influencia de la fertilización en el vivero sobre la calidad de la planta de Pinus oocarpa Schiede y su desarrollo inicial en campo [Tesis de ingeniería, Universidad Nacional Agraria]. Repositorio Institucional UNA. https://buscador.una.edu.ni/Record/RepoUNA2755

AGRADECIMIENTO

Al Dios todo poderoso, por encaminarnos en nuestra etapa universitaria, un agradecimiento muy especial a la Mg. Annick Estefany Huaccha Castillo, por el apoyo incondicional y el asesoramiento durante este de trabajo de investigación, y por brindarnos las herramientas necesarias a través del Grupo de Investigación COSAPRA (Contaminación de Sistemas Agro-Forestales por Prácticas Agrícolas) del Instituto de Ciencia de Datos de la Universidad Nacional de Jaén.

De la misma forma al Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA, al Coordinador del área de Transferencia de Tecnología el Mg. Franklin Hitler Fernandez Zarate, a través del proyecto de inversión “Mejoramiento de los Servicios de Investigación y Transferencia de Tecnología Agraria en la Estación Experimental Agraria Baños del Inca en la localidad Los Baños del Inca del distrito Los Baños del Inca - provincia de Cajamarca - departamento de Cajamarca”, identificado con el código único de inversión 2472675, y demás personas que colaboraron con el logro de esta investigación.

DEDICATORIA

A Dios, el cual ha es mi guía, mi fortaleza y el motor que impulsa cada uno de mis pasos durante este camino. Su gracia me sostuvo en los momentos de mayor dificultad y su sabiduría ilumino mi mente para culminar esta meta.

A mis padres Elmer y Dalila, por su amor incondicional, sus sacrificios diarios y por enseñarme a nunca rendirme. A mis hermanos (Erlan, Diego, Antony y Aron), por ser motivación para ser un mejor ejemplo cada día.

A mi esposa Marianela, por su paciencia infinita, su apoyo inquebrantable en los días difíciles y por ser mi compañera idónea en este proyecto de vida. A mi hijo Aziel, por ser la luz que ilumina mis días y la razón principal para construir un futuro mejor.

Jerson Tantalean Martinez

El presente trabajo de investigación va en primer lugar a Dios por ser mi fortaleza en cada día y por permitirme alcanzar una de mis metas que me he propuesto. También va dedicado a mis padres Diego Avellaneda Días y Alcira Delgado Herrera por su constante apoyo que me brindaron durante el proceso de logar terminar mi carrera profesional.

Agradezco a cada uno de mis hermanos por su contante apoyo y esperando ser ese reflejo que les impuse a ser mejores cada día.

Jairo Avellaneda Delgado

ANEXOS

Anexo 1: Datos obtenidos en la fase de crecimiento y desarrollo morfológico de *E. deglupta* Bume.

Tabla 11

Base de datos del crecimiento y desarrollo morfológico de los plantones

Tratamiento	H	D	NH	AF	ICC	MHT	MST	IL	IR	ICD
T1R1	23,90	1.60	12	415,15	30.30	7,85	2,59	33,05	12,77	0.12
T1R2	18,90	1.50	4	257,98	33,70	7,73	2,30	29,75	10.23	0.10
T1R3	20.70	1.80	8	313,85	32,13	7,74	2,35	30.34	11.50	0.11
T1R4	19,30	2,30	11	268,43	32,40	7,64	2,15	31.00	11.00	0.11
T2R1	26,68	2,82	27	303,12	47,27	15,76	5,14	32,45	10.18	0.33
T2R2	30.23	3,03	33	500.13	45,00	29,79	10.49	34,55	10.53	0.63
T2R3	26,77	2,34	20	255,31	45,00	14,34	4,44	30.95	11.87	0.26
T2R4	29,78	2,57	15	193,40	42,24	14,01	4,56	32,69	10.45	0.29
T3R1	24,55	2,30	27	322,86	34,49	12,28	3,93	30.94	10.19	0.12
T3R2	27,55	2,70	32	301.17	36,75	10.88	3,10	29,25	10.74	0.14
T3R3	22,60	2,10	29	331.60	33,87	12,61	3,93	31.17	10.76	0.14
T3R4	29,50	2,90	30	292,44	37,37	10.55	3,10	29,33	10.17	0.11

Anexo 2: Panel fotográfico del crecimiento y desarrollo morfológico de *E. deglupta* Blume post-repique en diferentes sustratos.

a. Adquisición de sustratos



b. Tamizaje y desinfección



c. Preparación de mezcla



d. Llenado de bolsas con sustrato



e. Obtención y repique de plántulas



f. Actividades culturales



g. Parámetros a evaluar

Altura de planta (cm)



Diámetro basal (mm)



Numero de hojas



Área foliar



Anexo 3: Panel fotográfico del análisis la influencia de los diferentes sustratos.

a. Analisis del indice critico de clorifila.



b. Análisis de la biomasa humedad total



c. Análisis de la biomasa seca total





d. Recolección de muestras de suelo





Anexo 4: Resultados de los análisis de suelo.

a. Informe de análisis de suelo en NPK

Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO
LABSAF YANAYACU
N° 123631-25NA / SU / YAN

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: CE Yanayacu
Propietario / Productor	: Jairo Avellaneda Delgado
Dirección del cliente	: Carretera Jaén-San ignacio km 23.7
Solicitado por	: CE YANAYACU
Muestreado por	: Jairo Avellaneda Delgado
Referencia del muestreo	: Reservado por el Cliente
Procedencia de muestra(s) (***)	: Parcela: T2Sector: YANAYACU Distrito/Provincia: JAEN / JAEN Coordenadas UTM Zona 17M: Este: 746450 Norte: 9372022 Altitud: 647
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2025-09-28
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-10-22
Lugar de ensayo	: LABSAF YANAYACU
Fecha(s) de análisis	: Del 2025-10-24 al 2025-12-18
Cotización del servicio	: 081-25-YAN
Fecha de emisión	: 2025-12-29

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM			1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio			SU3631-YAN-25	-	-	-	-	-
Matriz Analizada			Suelo	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)			2025-09-28	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)			9.10 AM	-	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)			T2	-	-	-	-	-
Ensayo	Unidad	LC	Resultados					
Acidez Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,6	<0,6	-	-	-	-	-
Aluminio Intercambiable	cmol (+)/Kg	0,2	0,2	-	-	-	-	-
Carbonato De Calcio Equivalente	%	0,20	8,50	-	-	-	-	-
Materia Organica	%	0,40	0,90	-	-	-	-	-
Nitrógeno- Materia Orgánica	mg/g	-	0,45	-	-	-	-	-
Potasio Disponible	mg/kg	-	377,39	-	-	-	-	-
Fósforo Disponible	mg/kg	1,50	36,39	-	-	-	-	-

Instituto Nacional de Innovación Agraria

INFORME DE ENSAYO
LABSAF YANAYACU
N° 123631-25NA / SU / YAN

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
Acidez y Aluminio Intercambiable	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.3.29, AS-33 2002 Determinación de Acidez y Aluminio Intercambiable (AS-33 método de Cloruro de Potasio).
Carbonato De Calcio Equivalente	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.3.25, AS-29 2002 Determinación de los carbonatos de calcio equivalente (AS-29 Método de neutralización ácida).
Materia Orgánica	NOM-021-RECNAT-2000; 2da Sección. 2002; Ítem 7.1.7 AS-07 2002 Determinación de Materia Orgánica (AS-07 Walkley y Black)
Nitrógeno- Materia Orgánica	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 .Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.1.7 AS-07. Determinación Nitrogeno por calculo a partir de Materia Organica (AS-07 Walkley y Black).
Potasio Disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.1.12, AS-12 // EPA 7000 B. Revision 2. 2007). Validado (modificado y aplicado fuera del alcance) 2023 Determinación de potasio disponible en suelos con saturación de acetato de amonio 1N, PH 7.0 // Flame Atomic Absorption Spectrophotometry
Fósforo Disponible	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.1.10, AS-10 2002 Determinación de fósforo aprovechable para suelos neutros y alcalinos (AS-10 Método de Olsen y colaboradores).

IV. CONSIDERACIONES

- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C.
- Medición de Conductividad Electrica realizada a 25 °C.

(**) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de ensayo que no han sido acreditados por el INACAL-DA, debido a que la muestra no es idónea para el ensayo.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Ing.Irene Sánchez Córdova - Responsable del LABSAF - YANAYACU

Firma

FIN DE INFORME DE ENSAYO

Red de Laboratorios de Suelos, Aguas y Foliares
Acreditado con la Norma
NTP-ISO/IEC 17025:2017
LABSAF YANAYACU
Dirección: Carretera Jaén San Ignacio km 23.7, Jaén, Jaén, Cajamarca
Email: labsafjaen@gmail.com

b. Informe de análisis de suelo en pH y conductividad eléctrica

Instituto Nacional de Innovación Agraria

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 200

INACAL DA - Perú

INFORME DE ENSAYO
LABSAF YANAYACU
N° 123631-25 / SU / YAN

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente	: CE Yanayacu
Propietario / Productor	: Jairo Avellaneda Delgado
Dirección del cliente	: Carretera Jaén-San ignacio km 23.7
Solicitado por	: CE YANAYACU
Muestreado por (***)	: Jairo Avellaneda Delgado
Referencia del muestreo (***)	: Reservado por el Cliente
Procedencia de muestra(s) (***)	: Parcela: T2Sector: YANAYACU Distrito/Provincia: JAEN / JAEN Coordenadas UTM Zona 17M: Este: 746450 Norte: 9372022 Altitud: 647
Fecha(s) de muestreo (***)	: 2025-09-28
Fecha de recepción de muestra(s)	: 2025-10-22
Lugar de ensayo	: LABSAF YANAYACU
Fecha(s) de análisis	: 2025-45954-24
Cotización del servicio	: 081-25-YAN
Fecha de emisión	: 2025-12-29

Pro Suelos y Aguas LABSAF

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM			1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio			SU3631-YAN-25	-	-	-	-	-
Matriz Analizada			Suelo	-	-	-	-	-
Fecha de Muestreo (***)			2025-09-28	-	-	-	-	-
Hora de Inicio de Muestreo (h) (***)			9.10 AM	-	-	-	-	-
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente (***)			T2	-	-	-	-	-
Ensayo	**Unidad**	**LC**	**Resultados**					
pH	unid. pH	0,1	7,5	-	-	-	-	-
Conductividad Electrica	mS/m	1,0	44,8	-	-	-	-	-
textura	-	-	-	-	-	-	-	-
Arena	%	-	70,44	-	-	-	-	-
Arcilla	%	-	18,28	-	-	-	-	-
Limo	%	-	11,28	-	-	-	-	-
Clase textural	-	-	Franco Arenosa	-	-	-	-	-

INFORME DE ENSAYO
LABSAF YANAYACU
N° 123631-25 / SU / YAN

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	EPA Method 9045 D Rev. 4 2004 Soil and waste pH.
Conductividad Electrica	ISO 11265:1994 / Cor 1:1996 1994 Soil quality -- Determination of the specific electrical conductivity
Textura	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Item 7.1.9, AS-09 2002 Determinación de la textura del suelo (AS-09 Método de Bouyoucos).

Pro Suelos y Aguas
LABSAF

IV. CONSIDERACIONES

- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los items sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C.
- Medición de Conductividad Electrica realizada a 25 °C.

(***) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Irene Sánchez Córdova - Responsable del LABSAF - YANAYACU

Firma

FIN DE INFORME DE ENSAYO

Anexo 5: Resultados del análisis estadístico.

Se presentan las tablas correspondientes al análisis de varianza (ANOVA) y a las pruebas de comparación múltiple de Tukey para los tratamientos T1, T2 y T3, considerados en la evaluación estadística final.

Tabla 4

Análisis de varianza (ANOVA) para la altura de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	123,61	2	61.81	9,81	0.0055	4,26
Dentro de los grupos (Error)	56,72	9	6,30			
Total	180.33	11				

Tabla 5

Prueba de Tukey para la altura de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Intervalo de confianza (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	+7,67	[2,71; 12,62]	0.0049	Sí
T3 vs. T1	+5,35	[0.39; 10.30]	0.0355	Sí
T3 vs. T2	-2,32	[-7,28; 2,64]	0.4265	No

Tabla 6

Análisis de varianza (ANOVA) para el diámetro basal de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	1.7682	2	0.8841	11.43	0.0034	4,26
Dentro de los grupos (Error)	0.6963	9	0.0774			
Total	2,4645	11				

Tabla 7

Prueba de Tukey para el diámetro basal de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Intervalo de confianza (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	+0.892	[0.343; 1.442]	0.0036	Sí
T3 vs. T1	+0.703	[0.153; 1.252]	0.0150	Sí
T3 vs. T2	-0.190	[-0.739; 0.359]	0.6150	No

Tabla 8

Análisis de varianza (ANOVA) para el número de hojas de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	944,73	2	472,37	21.70	0.0004	4,26
Dentro de los grupos (Error)	195,87	9	21.76			
Total	1140.60	11				

Tabla 9

Prueba de Tukey para el número de hojas de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior (95 %)	Límite superior (95 %)	Significativa
T2 vs. T1	+15,35	6,14	24,56	Sí
T3 vs. T1	+21.00	11.79	30.21	Sí
T3 vs. T2	-5,65	-14,86	3,56	No

Tabla 10

Análisis de varianza (ANOVA) para el área foliar de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	10 114,27	2	5 057,13	0.70	0.522	4,26
Dentro de los grupos (Error)	65 110.85	9	7 234,54			
Total	75 225,12	11				

Tabla 11

Prueba de Tukey para el área foliar de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior (95 %)	Límite superior (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	+68,48	-99,44	236,40	0.516	No
T3 vs. T1	+50.85	-117,07	218,77	0.686	No
T2 vs. T3	+17,63	-150.30	185,55	0.954	No

Tabla 12

Análisis de varianza (ANOVA) para el índice crítico de clorofila (ICC) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	347,07	2	173,53	57,26	< 0.0001	4,26
Dentro de los grupos (Error)	27,28	9	3,03			
Total	374,34	11				

Tabla 13

Prueba de Tukey para el índice crítico de clorofila (ICC) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior (95 %)	Límite superior (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	+12,75	9,31	16,18	< 0.0001	Sí
T3 vs. T1	+3,49	0.05	6,92	0.0469	Sí
T3 vs. T2	-9,26	-12,69	-5,82	0.0001	Sí

Tabla 14

Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa húmeda total (g) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	236,65	2	118,33	6,07	0.0215	4,26
Dentro de los grupos (Error)	175,52	9	19,50			
Total	412,17	11				

Tabla 15

Prueba de Tukey para la biomasa húmeda total (g) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior (95 %)	Límite superior (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	+10.73	2,02	19,45	0.0184	Sí
T3 vs. T1	+3,84	-4,88	12,56	0.4664	No
T3 vs. T2	-6,89	-15,61	1.82	0.1232	No

Tabla 16

Análisis de varianza (ANOVA) para la biomasa seca total (g) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	30.46	2	15,23	5,24	0.0310	4,26
Dentro de los grupos (Error)	26,16	9	2,91			
Total	56,62	11				

Tabla 17

Prueba de Tukey para la biomasa seca total (g) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior (95 %)	Límite superior (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	+3,81	0.44	7,17	0.0282	Sí
T3 vs. T1	+1.16	-2,20	4,53	0.6150	No
T3 vs. T2	-2,64	-6,01	0.72	0.1259	No

Tabla 18

Análisis de varianza (ANOVA) para el índice de lignificación (IL) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	12,76	2	6,38	3,62	0.0704	4,26
Dentro de los grupos (Error)	15,88	9	1.76			
Total	28,64	11				

Tabla 19

Prueba de Tukey para el índice de lignificación (IL) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior (95 %)	Límite superior (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	+1.62	-1.00	4,25	0.2468	No
T3 vs. T1	-0.86	-3,49	1.76	0.6430	No
T3 vs. T2	-2,49	-5,11	0.14	0.0626	No

Tabla 20

Análisis de varianza (ANOVA) para el índice de robustez (IR) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	1.73	2	0.86	1.42	0.2902	4,26
Dentro de los grupos (Error)	5,46	9	0.61			
Total	7,18	11				

Tabla 21

Prueba de Tukey para el índice de robustez (IR) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior (95 %)	Límite superior (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	-0.62	-2,15	0.92	0.5255	No
T3 vs. T1	-0.91	-2,45	0.63	0.2743	No
T3 vs. T2	-0.29	-1.83	1.24	0.8582	No

Tabla 22

Análisis de varianza (ANOVA) para el Índice de Calidad de Dickson (ICD) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p-valor	F crítico
Entre grupos (Tratamientos)	0.18	2	0.09	9,12	0.0068	4,26
Dentro de los grupos (Error)	0.09	9	0.01			
Total	0.27	11				

Tabla 23

Prueba de Tukey para el Índice de Calidad de Dickson (ICD) de E. deglupta en diferentes sustratos.

Comparación	Diferencia de medias	Límite inferior (95 %)	Límite superior (95 %)	p ajustado	Significativa
T2 vs. T1	+0.27	0.07	0.46	0.0103	Sí
T3 vs. T1	+0.02	-0.18	0.21	0.9663	No
T2 vs. T3	+0.25	0.05	0.45	0.0150	Sí