

Artículo Original

Efecto de biofertilizantes de subproductos del café sobre crecimiento inicial y calidad morfológica de *Gliricidia sepium* (Jacq.) en vivero

Effect of coffee by-product biofertilizers on early growth and morphological quality of Gliricidia sepium (Jacq.) in nursery

Ezer Isaí Aguiriano Figueroa

Ingeniero en Energía Renovable, Investigador Independiente
San Francisco de la Paz, Olancho, Honduras

 ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4076-6416>

Juan Miguel Benítez Mendoza

Extensionista Instituto Hondureño del Café (IHCAFE)

San Francisco de la Paz, Olancho, Honduras

 ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0806-0349>

Jesús Alexi Oviedo Ramos

Investigador Universidad Nacional de Ciencias Forestales (UNACIFOR)

Siguatepeque, Comayagua, Honduras

 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0513-8976>

*Autor correspondiente: j.oviedo@unacifor.edu.hn

Recepción: abril de 2026. **Aceptación:** mayo de 2026. **Publicación:** junio de 2026.

Como citar: Aguiriano Figueroa, E. I., Benítez Mendoza, J. M., & Oviedo Ramos, J. A. (2026). Efecto de biofertilizantes de subproductos del café sobre crecimiento inicial y calidad morfológica de *Gliricidia sepium* (Jacq.) en vivero. *TATASCÁN*, 34 (1), 7–16. <https://doi.org/10.5377/tatascn.v34i1.22934>

Resumen: Se evaluó el efecto de dos biofertilizantes elaborados a partir de subproductos del café —biol de aguas mieles y compost de pulpa— sobre el crecimiento inicial y la calidad morfológica de *Gliricidia sepium* (Jacq.) en condiciones de vivero, en San Francisco de la Paz, Olancho, Honduras. Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA) con tres tratamientos, cuatro repeticiones, medidas repetidas en el tiempo y submuestreo. Las variables continuas se analizaron mediante modelos lineales mixtos y la sobrevivencia mediante un modelo lineal generalizado mixto con distribución binomial. La sobrevivencia superó el 98 % sin diferencias entre tratamientos. La interacción Tratamiento × Tiempo fue significativa para altura, DAC e IE ($p < .001$). Al final del ensayo, el Compost alcanzó la mayor altura (26.73 cm) y DAC (6.93 mm), seguido del Biol y el Testigo. Los biofertilizantes constituyen una alternativa viable para mejorar el crecimiento inicial de *G. sepium* en vivero.

Palabras clave: dendroenergía, lombricompostaje, biol, calidad de planta, *Coffea arabica*.

Abstract: The effect of two biofertilizers produced from coffee by-products —honey-water biol and pulp compost— on the early growth and morphological quality of *Gliricidia sepium* (Jacq.) was evaluated under nursery conditions, in San Francisco de la Paz, Olancho, Honduras. A completely randomized design (CRD) with three treatments, four replicates, repeated measurements over time, and subsampling was used. Continuous variables were analyzed using linear mixed models, and survival through a binomial generalized linear mixed model. Survival exceeded 98% with no differences among treatments. The Treatment × Time interaction was significant for height, root collar diameter (RCD), and slenderness index (SI) ($p < .001$). At the end of the trial, compost reached the greatest height (26.73 cm) and RCD (6.93 mm), followed by Biol and the Control. Biofertilizers are a viable alternative for improving the early growth of *G. sepium* in nurseries.

Keywords: dendroenergy, vermicomposting, biol, plant quality, *Coffea arabica*.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas energéticas renovables eficientes representa uno de los retos más relevantes para la humanidad en el contexto actual. En este sentido, la energía de la biomasa, en particular a través de las especies dendroenergéticas, se postula como una de las opciones más prometedoras para su implementación en distintos países (Patiño-Díez & Smith-Quintero, 2008). *Gliricidia sepium* destaca entre estas especies por su potencial dendroenergético en regiones tropicales.

El uso de biofertilizantes para incrementar la producción de biomasa a bajo costo es una de las opciones sostenibles para reducir el uso total o parcial de los insumos químicos (Araujo-Abad & Collahuazo-Reinoso, 2019). Estos son productos provenientes de insumos locales aprovechables, lo que contribuye a mejorar la cadena de producción. Se ha reportado que del proceso de beneficio del café se generan subproductos como la pulpa, el muílago y la cascarilla, los cuales pueden ser aprovechados de distintas formas (Flórez-Delgado & Rosales-Asensio, 2018).

El aprovechamiento a bajo costo de estos subproductos del café es una alternativa sostenible que puede aportar en el desarrollo de la especie dendroenergética *Gliricidia sepium*. Sin embargo, existe escasa información sobre el efecto de biofertilizantes elaborados a partir de subproductos del café sobre el desarrollo inicial en condiciones de vivero de esta especie. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de dos biofertilizantes sobre el desarrollo de la especie *Gliricidia sepium* en condiciones de vivero. Los resultados obtenidos aportan información técnica para el aprovechamiento de subproductos del café como insumos en la producción de especies forestales con interés energético.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este artículo tiene como antecedente la tesis de pregrado de Aguiriano Figueroa (2025), defendida en la Universidad Nacional de Ciencias Forestales (UNACIFOR). Los datos experimentales recolectados fueron reanalizados mediante modelos lineales mixtos y el modelo lineal generalizado mixto binomial, descritos en la sección de Análisis Estadístico. Este abordaje permitió modelar explícitamente la autocorrelación temporal entre mediciones repetidas, la heterocedasticidad residual y la estructura anidada del submuestreo.

Diseño de la Investigación

Se empleó un enfoque cuantitativo con alcance explicativo. El estudio correspondió a un diseño completamente al azar (DCA) con tres tratamientos y medidas repetidas en el tiempo sobre las mismas unidades experimentales, con cuatro repeticiones y submuestreo. Los tratamientos evaluados fueron: T1 = sustrato local (Testigo), T2 = biol de aguas mieles de café aplicado vía foliar (Biol) y T3 = compost de pulpa de café incorporado al sustrato (Compost). Las mediciones se realizaron a los 17, 32, 47 y 63 días después de la aplicación de los tratamientos. La unidad experimental (UE) estuvo constituida por 30 plántulas, para un total de 360 plántulas en el ensayo (3 tratamientos × 4 repeticiones × 30 plántulas por unidad experimental). En cada tiempo de evaluación se midió un submuestreo aleatorio de 10 plántulas por unidad experimental. Las 12 unidades experimentales fueron asignadas completamente al azar y dispuestas en tres arreglos físicos de cuatro unidades cada uno (Figura 1), con el propósito de reducir posibles gradientes espaciales iniciales, conforme a los principios descritos por Kuehl (2000).

Figura 1
 Croquis de campo de la distribución de tratamientos y repeticiones



El modelo estadístico-matemático utilizado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + u_{j(i)} + \eta_{k(j)}$$

Donde Y_{ijk} es el valor de la variable respuesta de la k -ésima plántula dentro de la j -ésima unidad experimental del i -ésimo tratamiento en el i -ésimo tiempo; μ es la media general; τ_i es el efecto fijo del i -ésimo tratamiento; β_j es el efecto fijo del j -ésimo tiempo; $(\tau\beta)_{ij}$ es el efecto de la interacción Tratamiento × Tiempo; $u_{j(i)}$ es el efecto aleatorio de la j -ésima unidad experimental anidada en el i -ésimo tratamiento, con $u_{j(i)} \sim N(0, \sigma^2_u)$; y $\eta_{k(j)}$ es el residuo, que incorpora la variabilidad entre plántulas dentro de cada UE y la variabilidad temporal dentro de cada UE.

Los residuos se modelaron con dos componentes de covarianza: (i) estructura autorregresiva de primer orden AR(1) entre mediciones sucesivas dentro de la misma UE, con $\text{Cov}(\eta_{k(j)}, \eta_{k(j+h)}) = \sigma^2_\epsilon \rho^{|h|}$, donde ρ es el parámetro de autocorrelación temporal y h es el desfase entre mediciones; y (ii) estructura de varianza heterogénea por tratamiento (*varIdent*), de modo que $\text{Var}(\eta_{k(j)} | \tau_i) = \sigma^2_i$, permitiendo varianzas residuales diferentes para Testigo, Biol y Compost.

Trabajo de Campo

Elaboración de biofertilizantes

Se recolectaron aproximadamente 226.8 kg (500 lb) de pulpa de café y 100 L de aguas mieles de café en una finca ubicada en la comunidad de La Bellota, San Francisco de la Paz (14°53'0.58" N, 86°5'21.83" O). La pulpa fue sometida a precomposteo mediante volteo periódico durante cuatro semanas para reducir humedad y temperatura (Clavijo & Jiménez, 2016). Posteriormente, el material precompostado se trasladó a una compostera de madera reciclada de 2.0 × 0.8 × 0.4 m (largo × ancho × profundidad útil), con una superficie efectiva de 1.6 m², donde se inculcó con lombriz roja californiana (*Eisenia fetida*) a una densidad de 0.26 kg/m². El proceso de lombricompostaje se mantuvo durante tres meses hasta obtener un producto oscuro y homogéneo. En paralelo, las aguas mieles se cargaron en un biofermentador hermético que se mantuvo a temperatura ambiente (≈ 26 °C) durante tres meses.

para la fermentación anaerobia (Granda Granadino & Martínez Torres, 2020). Al término de ambos procesos, muestras fueron remitidas al Laboratorio Químico Agrícola del IHCAFE, donde se realizó digestión ácida ($\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{O}_2$) y posterior cuantificación elemental mediante ICP-OES bajo metodología de análisis multielemental.

Producción de plántulas

Se construyó un germinador con bloques de concreto ($1.2 \times 0.8 \times 0.15$ m) que contenía arena de río previamente desinfectada con agua hirviendo. La siembra se realizó en surcos separados a 6 cm, previa hidratación en agua a temperatura ambiente durante 24 h (CONABIO, 2016). El material genético procedió del banco de semillas de la UNACIFOR, Siguatepeque, Honduras, lo que garantizó uniformidad genotípica entre tratamientos. Las plántulas fueron trasplantadas a bolsas de polietileno ($5'' \times 7''$) con suelo base al inicio de la fase experimental (octubre de 2024) y distribuidas en un vivero provisional construido sobre suelo nivelado y limpiado, conforme al arreglo experimental mostrado en la Figura 1. Para prevenir la incidencia de hongos del suelo, el sustrato fue tratado con los productos comerciales Alondra (principios activos: triazol y estrobilurinas) y Biofase (principios activos: agentes acidificantes, alcohol tridecil polioxietileno—surfactante/coadyuvante— y Dietilenglicol). Posteriormente, se instaló malla sarán con el propósito de reducir el impacto directo de la precipitación y regular la radiación durante el periodo de establecimiento de las plántulas.

Aplicación de tratamientos

La aplicación de los tratamientos inició el 30 de octubre de 2024, cuando las plántulas presentaban una altura promedio de 9 cm y un diámetro al cuello (DAC) de 2 mm. No se aplicó ninguna enmienda durante el periodo experimental en T1 (Testigo). En T2 (Biol) se realizaron cuatro aplicaciones foliares con bomba aspersora de 16 L a intervalos de 15 días (30/10, 15/11, 30/11 y 15/12/2024). En la primera aplicación la mezcla en la bomba fue de 3 L de biol + 13 L de agua; en las tres restantes, 5 L de biol + 11 L de agua. De cada bomba preparada se aplicaron 4 L por unidad experimental. En T3 se incorporaron 60 g de compost en la superficie del sustrato de cada planta el 30 de octubre de 2024. El riego se reguló en los tres tratamientos según la humedad del sustrato. En T2, los días de aplicación foliar no se realizó riego adicional, dado que la aspersión aportaba humedad suficiente al sistema.

Medición de Variables

Variables independientes

El diseño incluyó dos factores: (a) tratamiento, con tres niveles: T1 (Testigo sin enmienda), T2 (Biol) y T3 (Compost); y (b) tiempo de evaluación, con cuatro niveles: 17, 32, 47 y 63 días después de la aplicación de los tratamientos (dda).

Variables dependientes

Se evaluaron cuatro variables de respuesta morfológica:

- Altura de planta (cm): longitud desde la base del tallo hasta el ápice terminal.
- Diámetro al cuello (DAC, mm): medido a 1 cm sobre la línea del suelo.
- Índice de esbeltez (IE): calculado como la razón altura/DAC, indicador del balance entre crecimiento apical y engrosamiento del tallo (Mexal & Landis, 1990). Su interpretación se realizó bajo los siguientes rangos: $\text{IE} < 6.0$ = alta calidad, $6.0-7.9$ = calidad media e $\text{IE} \geq 8.0$ = baja calidad (Rueda-Sánchez et al., 2018).
- Sobrevivencia (%): porcentaje de plantas vivas por unidad experimental en cada tiempo de evaluación.

Para la medición de las variables morfológicas en cada tiempo de evaluación (16/11, 01/12, 16/12/2024 y 01/01/2025), se seleccionaron aleatoriamente 10 plántulas por repetición. Se registró la altura de planta con cinta métrica y el DAC con vernier analógico. El IE se calculó a partir de estas mediciones. La sobrevivencia se determinó mediante el conteo directo de plantas vivas y muertas en cada unidad experimental al finalizar cada periodo de evaluación.

Caracterización de los biofertilizantes

La composición química de los biofertilizantes se determinó mediante análisis de laboratorio por digestión húmeda, cuantificando macronutrientes N, P, K, Ca y Mg (%) y micronutrientes Fe, Mn, Zn y Cu (ppm).

Análisis Estadístico

La prueba de Levene aplicada a los residuos normalizados rechazó la homocedasticidad para las tres variables (altura: $F = 24.90$, $p < .001$; DAC: $F = 4.94$, $p = .008$; IE: $F = 11.60$, $p < .001$), lo que justificó la estructura varIdent especificada en el modelo. La prueba de Shapiro-Wilk aplicada a los residuos del modelo final rechazó normalidad (altura: $W = 0.994$, $p = .045$; DAC: $W = 0.986$, $p < .001$; IE: $W = 0.943$, $p < .001$); sin embargo, el modelo se mantuvo dada su robustez ante desviaciones moderadas con tamaños muestrales grandes (Verbeke & Molenberghs, 2000).

La sobrevivencia, modelada como proporción binomial (plantas vivas/plantas totales), se analizó mediante un modelo lineal generalizado mixto (GLMM) con enlace logit y distribución binomial, incluyendo Tratamiento, Tiempo y su interacción como efectos fijos, y la unidad experimental como efecto aleatorio para considerar la no independencia de las observaciones dentro de cada unidad. Se evaluó la significancia de los efectos fijos mediante pruebas Wald tipo II del paquete car. Se reportaron proporciones estimadas, error estándar e intervalos de confianza del 95 %, obtenidos mediante el método de Wald.

El submuestreo dentro de cada UE se utilizó para mejorar la precisión de las estimaciones a nivel de unidad experimental, mientras que la inferencia de los efectos de tratamiento se basó en la variabilidad entre UE como unidad experimental efectiva. Los grados de libertad del denominador reflejan este nivel de submuestreo, garantizando inferencia a nivel de UE y evitando pseudoreplicación en las pruebas de hipótesis.

Las variables continuas de crecimiento (altura, DAC e IE) se analizaron mediante un modelo lineal mixto (LME) con Tratamiento, Tiempo y su interacción como efectos fijos y la UE como efecto aleatorio (Verbeke & Molenberghs, 2000). Las comparaciones múltiples entre tratamientos se realizaron dentro de cada tiempo mediante el ajuste de Tukey ($p < .05$). El tamaño del efecto se cuantificó con eta cuadrado parcial (η^2_p) e intervalos de confianza al 95 % (Cohen, 2009).

Los análisis se realizaron en R versión 4.5.3 (R Core Team, 2026) utilizando los paquetes *nlme* (Pinheiro et al., 2025), *emmeans* (Lenth & Piaskowski, 2026), *effectsize* (Ben-Shachar et al., 2020) y *car* (Fox & Weisberg, 2019), con nivel de significancia $\alpha = .05$. El procesamiento estadístico se ejecutó en 2026 con las versiones de R y paquetes vigentes en ese momento, sobre los datos recolectados entre octubre de 2024 y enero de 2025.

RESULTADOS

Características Químicas de los Biofertilizantes

El compost de pulpa de café presentó concentraciones mayores que el Biol en todos los macronutrientes y en la mayoría de los micronutrientes analizados (Tabla 1). El zinc fue el único elemento más concentrado en el Biol (5.2 ppm) que en el Compost (0.4 ppm).

Tabla 1
Composición química del biol y el compost utilizados como biofertilizantes

Nutriente	Concentración	
	Biol	Compost
N (%)	0.19	1.68
P (%)	0.01	0.11
K (%)	0.07	1.50
Ca (%)	0.11	1.87
Mg (%)	0.02	0.17
Fe (ppm)	532.8	1319.9
Mn (ppm)	12.0	239.4
Zn (ppm)	5.2	0.4
Cu (ppm)	4.7	33.4

Nota. Los valores corresponden al análisis químico de laboratorio; ppm = partes por millón.

Sobrevivencia

La Tabla 2 muestra que no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre la probabilidad de sobrevivencia de *Gliricidia sepium* del tratamiento ($\chi^2(2) = 1.67, p = .435$), del tiempo ($\chi^2(3) = 3.66, p = .301$) ni de la interacción Tratamiento \times Tiempo ($\chi^2(6) = 1.90, p = .929$). Los tratamientos registraron tasas superiores al 98 % durante todo el período, con probabilidades estimadas que oscilaron entre 0.983 y 1.000 (Figura 2). Al cierre del ensayo, el Compost mostró una mayor proporción observada (99.38 %, EE = 0.0036), sin que estas diferencias alcanzaran significancia estadística (Tabla 3).

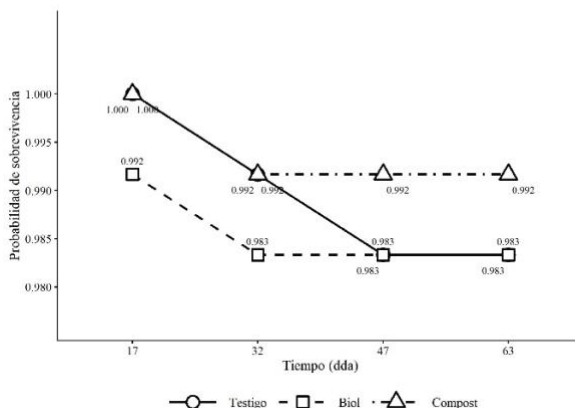
Tabla 2
Efecto de los factores del modelo sobre la sobrevivencia de Gliricidia sepium

Fuente de variación	χ^2	gl	p
Tratamiento	1.67	2	.435
Tiempo	3.66	3	.301
Tratamiento \times Tiempo	1.90	6	.929

Nota. Resultados obtenidos mediante un modelo lineal generalizado binomial. Prueba chi-cuadrado de Wald Tipo II.

Figura 2

Probabilidad de sobrevivencia estimada de *Gliricidia sepium* por tratamiento en el tiempo



Nota. dda = días después de la aplicación de los tratamientos. Los puntos representan las probabilidades estimadas mediante un modelo lineal generalizado binomial (GLM, enlace logit). Los valores sobre los puntos indican dichas probabilidades.

Tabla 3

Estadísticos descriptivos de la sobrevivencia observada de *Gliricidia sepium* por tratamiento

Tratamiento	n	Sobrevivencia (%)	EE	IC 95 %
Testigo	480	98.96	0.0046	[98.1, 100]
Biol	480	98.54	0.0055	[97.5, 100]
Compost	480	99.38	0.0036	[98.7, 100]

Nota. n = número total de plantas evaluadas por tratamiento durante todo el período; sobrevivencia (%) = proporción observada al cierre; EE = error estándar binomial; IC del 95% = intervalo de confianza (método de Wald).

Altura

El efecto de los tratamientos sobre la altura de *Gliricidia sepium* varió en función del tiempo de evaluación (Tabla 4; Figura 3). A los 17 dda, Biol (16.03 cm) y Compost (16.11 cm) superaron al Testigo (12.65 cm) sin mostrar diferencias entre sí. A partir de los 32 dda las diferencias entre los biofertilizantes comenzaron a acentuarse, de modo que a los 63 dda el Compost alcanzó la mayor altura (26.73 cm), seguido del Biol (23.43 cm) y el Testigo (14.43 cm), mostrando todos los pares de medias diferencias significativas ($p < .05$, Tabla 5).

Tabla 4

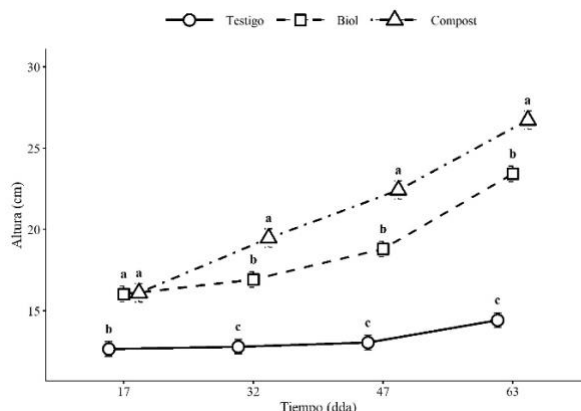
Efecto de los factores del modelo sobre la altura de *Gliricidia sepium*

Fuente de variación	gl num	gl den	F	p	η^2_p
Tratamiento	2	9	102.40	< .001	0.96
Tiempo	3	459	159.28	< .001	0.51
Tratamiento × Tiempo	6	459	37.58	< .001	0.33

Nota. gl num = grados de libertad del numerador; gl den = grados de libertad del denominador; F = estadístico F; p = valor p sin cero inicial; η^2_p = eta cuadrado parcial (IC 95%).



Figura 3
 Evolución de la altura media estimada de *Gliricidia sepium* por tratamiento en el tiempo



Nota. Medias marginales estimadas mediante modelo mixto lineal. Las barras de error representan el error estándar. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada período (Tukey, $p < .05$).

Tabla 5
 Comparación de la altura de *Gliricidia sepium* entre tratamientos y tiempos

Tratamiento	Tiempo (dda)	Media (cm)	EE	Agrupación de medias
Testigo		12.65	0.45	b
Biol	17	16.03	0.48	a
Compost		16.11	0.57	a
Testigo		12.80	0.45	c
Biol	32	16.93	0.48	b
Compost		19.48	0.57	a
Testigo		13.05	0.45	c
Biol	47	18.80	0.48	b
Compost		22.43	0.57	a
Testigo		14.43	0.45	c
Biol	63	23.43	0.48	b
Compost		26.73	0.57	a

Nota. dda = días después de la aplicación de los tratamientos; Media = media marginal estimada por el modelo mixto lineal; EE = error estándar; agrupación de Tukey: letras distintas indican diferencias significativas ($p < .05$).

DAC

Se encontraron diferencias significativas en la interacción Tratamiento \times Tiempo ($F(6, 459) = 18.49, p < .001, \eta^2_p = .19$), con un efecto de tratamiento de magnitud muy grande ($\eta^2_p = .98$, Tabla 6). A los 17 dda, Biol (3.38 mm) y Compost (3.40 mm) mostraron valores superiores al Testigo (2.10 mm). La diferenciación entre los biofertilizantes surgió a partir de los 47 dda, cuando el Compost (6.03 mm) superó al Biol (4.80 mm) y este al Testigo (3.20 mm), patrón que se consolidó a los 63 dda con valores de 6.93, 5.43 y 3.50 mm, respectivamente (Tabla 7; Figura 4). La diferencia progresiva entre los tres tratamientos fue más pronunciada para el DAC que para la altura, lo que sugiere un efecto diferencial de los biofertilizantes sobre el engrosamiento del tallo.

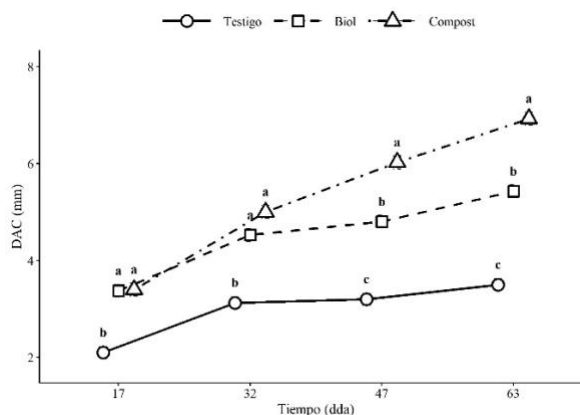
Tabla 6
 Efecto de los factores del modelo sobre el DAC (mm) de *Gliricidia sepium*

Fuente de variación	gl num	gl den	F	p	η^2_p
Tratamiento	2	9	239.35	< .001	0.98
Tiempo	3	459	206.24	< .001	0.57
Tratamiento × Tiempo	6	459	18.49	< .001	0.19

Tabla 7
 Comparación del DAC de *Gliricidia sepium* entre tratamientos y tiempos

Tratamiento	Tiempo (dda)	Media (mm)	EE	Agrupación de medias
Testigo		2.10	0.11	b
Biol	17	3.38	0.13	a
Compost		3.40	0.13	a
Testigo		3.13	0.11	b
Biol	32	4.53	0.13	a
Compost		5.00	0.13	a
Testigo		3.20	0.11	c
Biol	47	4.80	0.13	b
Compost		6.03	0.13	a
Testigo		3.50	0.11	c
Biol	63	5.43	0.13	b
Compost		6.93	0.13	a

Figura 4
 Evolución del DAC medio estimado de *Gliricidia sepium* por tratamiento en el tiempo



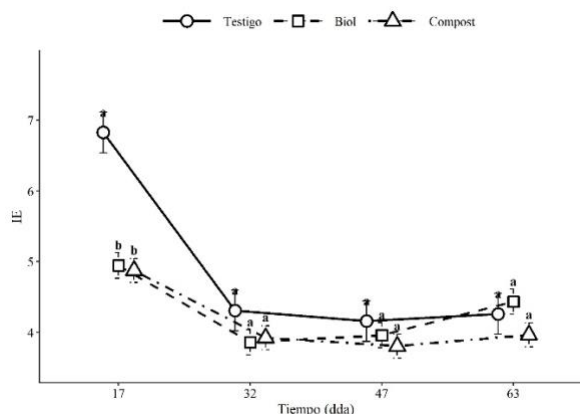
IE

La interacción Tratamiento × Tiempo también fue significativa para el IE ($F(6, 459) = 5.20, p < .001, \eta^2_p = .06$), con un tamaño de efecto mediano — el más modesto de las tres variables continuas evaluadas (Tabla 8). Las diferencias entre tratamientos se concentraron exclusivamente en el primer tiempo de medición: a los 17 dda el Testigo registró un IE (6.83), clasificado como calidad media, significativamente superior al Biol (4.95) y al Compost (4.88), clasificados como alta calidad. La Figura 5 ilustra que los biofertilizantes promovieron un mayor engrosamiento del tallo respecto al crecimiento apical durante las primeras semanas, reduciendo la esbeltez inicial; este efecto se diluyó con el tiempo hasta que los tres tratamientos alcanzaron valores de calidad morfológica similares.

Tabla 8
 Efecto de los factores del modelo sobre el IE de *Gliricidia sepium*

Fuente de variación	gl num	gl den	F	p	η^2_p
Tratamiento	2	9	6.21	.020	0.58
Tiempo	3	459	41.02	< .001	0.21
Tratamiento × Tiempo	6	459	5.20	< .001	0.06

Figura 5
 Evolución del IE medio estimado de *Gliricidia sepium* por tratamiento en el tiempo



DISCUSIÓN

El Compost concentró la mayoría de los macro y micronutrientes en mayor proporción que el Biol (Tabla 1). Esto coincide con lo reportado por Clavijo y Jiménez (2016) y Domínguez y Edwards (2011) para procesos de lombricompostaje, donde la digestión por *Eisenia fetida* estabiliza la materia orgánica y libera nutrientes en formas más biodisponibles. La menor concentración elemental del Biol responde al medio acuoso de la fermentación anaerobia, en el que parte del nitrógeno y otros elementos se pierden por volatilización o quedan ligados a la fracción líquida en bajas proporciones (Granda Granadino & Martínez Torres, 2020). El zinc fue el único elemento más concentrado en el Biol, patrón compatible con la solubilización de este micronutriente bajo condiciones anaerobias y de pH cercano a la neutralidad. Esta divergencia en la composición es relevante para interpretar el desempeño observado, ya que el contenido de potasio, calcio y fósforo del Compost se aproxima a los rangos identificados para *G. sepium* por Alamu et al. (2023), de modo que su aplicación al sustrato proveyó una matriz nutricional cercana a los requerimientos de la especie.

La sobrevivencia se mantuvo por encima del 98 % en los tres tratamientos, sin efecto significativo de la interacción Tratamiento × Tiempo. Este resultado indica que ninguno de los biofertilizantes resultó fitotóxico en las dosis ensayadas y que las pérdidas de plántulas durante el experimento se debieron a factores ambientales y de manejo más que por la nutrición. Berhe et al. (2024) advierten que la sobrevivencia de plántulas en vivero es un indicador conservador, sensible principalmente a estrés hídrico, plagas o calidad inicial del material. En este ensayo, la uniformidad genotípica del lote semillero y el manejo bajo malla serán explicar los valores altos y similares entre tratamientos.

El crecimiento en altura mostró una respuesta diferencial que se acentuó con el tiempo. A los 17 dda, Biol y Compost ya habían superado al Testigo en cerca de 3 cm sin diferenciarse entre sí, lo que sugiere una ventaja inicial común atribuible a la aplicación de cualquier biofertilizante. Sin embargo, a partir de los 32 dda el Compost se separó del Biol y mantuvo la mayor altura hasta los 63 dda (26.73 cm), patrón consistente con la liberación lenta de nutrientes característica de las enmiendas sólidas (Campos-Rodríguez et al., 2016) frente al efecto puntual de las aplicaciones foliares. El tamaño de efecto de la interacción ($\eta^2_p = .33$) confirma que la diferenciación temporal entre tratamientos no fue trivial.

El DAC presentó una dinámica análoga, pero con una diferenciación progresiva entre los tres tratamientos más marcada que la observada para altura. A los 63 dda, el Compost (6.93 mm) superó al Biol (5.43 mm) y este al Testigo (3.50 mm), con todos los pares significativamente distintos. Este patrón sugiere que los biofertilizantes —y particularmente el Compost— promovieron de manera preferente el engrosamiento del tallo, una variable estrechamente relacionada con la resistencia mecánica y el éxito en plantación a campo (Rueda-Sánchez et al., 2018). El mayor aporte de calcio y potasio del compost es coherente con esta respuesta, dado que ambos elementos participan en la formación de paredes celulares y en la regulación de la turgencia (Marschner, 2012).

El IE integra ambas variables y, por tanto, ofrece la lectura más informativa sobre la calidad morfológica. La interacción significativa, aunque con tamaño de efecto modesto ($\eta^2_p = .06$), reflejó que las diferencias se concentraron en el primer tiempo de medición: a los 17 dda el Testigo se ubicó en la categoría de calidad media (IE = 6.83) mientras que Biol y Compost ya alcanzaban valores de alta calidad (IE = 4.95 y 4.88, respectivamente). Esta ventaja temprana confirma que los biofertilizantes promovieron un

desarrollo más equilibrado entre tallo y altura desde las primeras semanas. Con el avance del tiempo los tres tratamientos convergieron dentro de la categoría de alta calidad, debido a que el Testigo creció proporcionalmente menos en altura que en diámetro y los biofertilizantes mantuvieron un balance estable entre ambos crecimientos. Por lo tanto, la utilidad práctica de los biofertilizantes no radica únicamente en obtener plántulas más vigorosas, sino en alcanzar la condición de calidad morfológica adecuada en menor tiempo.

CONCLUSIONES

El Compost presentó concentraciones de macro y micronutrientes superiores a las del Biol, con valores cercanos a los requerimientos nutricionales reportados para *Gliricidia sepium*, lo que respalda su mayor potencial como enmienda silvícola en condiciones de vivero.

Todos los tratamientos, incluido el Testigo, presentaron sobrevivencias superiores al 98 %, lo que confirma la seguridad de las dosis evaluadas para la especie.

Los biofertilizantes incrementaron el crecimiento en altura y DAC, destacando el efecto superior del Compost a partir de los 32 días después de la aplicación y hasta el final del periodo evaluado.

El Biol y el Compost permitieron alcanzar la categoría de alta calidad morfológica desde la primera medición, mientras que el Testigo lo logró en evaluaciones posteriores. En conjunto, el aprovechamiento de la pulpa de café y las aguas mieles como insumos para la elaboración de biofertilizantes representa una alternativa viable y sostenible para la producción de plántulas de *Gliricidia sepium* con fines dendroenergéticos.

Contribución de los autores

Aguiriano Figueroa diseñó el experimento, ejecutó el trabajo de campo, recolectó los datos y redactó el informe de tesis. Benítez Mendoza, en su calidad de asesor, orientó el diseño experimental, la metodología de campo, la interpretación biológica de los resultados y revisó el informe. Oviedo Ramos ejecutó el reanálisis con modelos lineales mixtos y contribuyó a la redacción de las secciones de metodología y resultados. Los tres autores revisaron y aprobaron la versión final del manuscrito y asumen responsabilidad conjunta por la veracidad, integridad y contenido del estudio.

Conflicto de interés

Los autores establecen que no existe ningún conflicto de intereses que pudieron haber influido en la elaboración o publicación de esta obra.

Financiamiento

El autor principal declara que no recibió financiamiento externo para la realización de esta investigación.

Uso de inteligencia artificial (IA)

La inteligencia artificial se empleó exclusivamente como herramienta de asistencia para la revisión y depuración de scripts en R. Todas las decisiones analíticas, el procesamiento estadístico y la interpretación de resultados fueron realizadas y validadas por los autores, quienes garantizaron la coherencia metodológica y la integridad del estudio.

REFERENCIAS

- Aguiriano Figueroa, E. I. (2025). Efecto de la aplicación de biofertilizantes, en el desarrollo de *Gliricidia sepium* (Jacq.) (Madreado) a nivel de vivero, en San Francisco de la Paz, Olancho, Honduras [Tesis de grado no publicada]. Universidad Nacional de Ciencias Forestales.
- Alamu, E. O., Adesokan, M., Fawole, S., Maziya-Dixon, B., Mehreteab, T., & Chikoye, D. (2023). *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp Applications for Enhancing Soil Fertility and Crop Nutritional Qualities: A Review. *Forests*, 14(3), 635. https://doi.org/10.3390/f14030635?utm_source=chatgpt.com
- Araujo-Abad, S., & Collahuazo-Reinoso, Y. (2019). Producción de Biofertilizantes a Partir de Microalgas. *CEDAMAZ*, 9(2), 81-87. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/648>
- Ben-Shachar, M. S., Lüdtke, D., & Makowski, D. (2020). effectsize: Estimation of effect size indices and standardized parameters. *Journal of Open Source Software*, 5(56), 2815. <https://doi.org/10.21105/joss.02815>
- Berhe, D. H., Gidey, T., Gebregziabher, D., Tesema, T., Anjulo, A., Retta, A. N., Sisay, A., & Okolo, C. C. (2024). Seedling survival and plantation success in the drylands of Northern Ethiopia. *Discover Agriculture*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00015-4>
- Campos-Rodríguez, R., Brenes-Peralta, L., & Jiménez-Morales, M. F. (2016). Evaluación técnica de dos métodos de compostaje para el tratamiento de residuos sólidos biodegradables domiciliarios y su uso en huertas caseras. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(8), 25. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2982>
- Clavijo, N. M., & Jiménez, A. A. R. (2016). Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras. <https://ridum.umanizales.edu.co/server/api/core/bitstreams/0b69551d-27cc-468b-9918-83d6160cd555/content>

Cohen, J. (2009). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. ed., reprint). Psychology Press.

<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9780203771587/statistical-power-analysis-behavioral-sciences-jacob-cohen>

- CONABIO. (2016). *Glicridia sepium*. . http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/29-legum19m.pdf
- Domínguez, J., & Edwards, C. (2011). Biology and Ecology of Earthworm Species Used for Vermicomposting. En C. Edwards, N. Arancon, & R. Sherman (Eds.), *Vermiculture Technology* (pp. 27-40). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10453-4>
- Flórez-Delgado, D. F., & Rosales-Asensio, E. (2018). Uso del ensilaje de pulpa de café en alimentación animal. *Mundo FESC*, 8(15), 73-82. <https://doi.org/10.61799/2216-0388.254>
- Fox, J., & Weisberg, S. (2019). *An R companion to applied regression* (3.ª ed.). Sage. <https://www.john-fox.ca/Companion/>
- Granda Granadino, D. C., & Martínez Torres, J. F. (2020). Determinación de parámetros óptimos de anaerobiosis del agua miel de café en la finca cafetalera el Limón del distrito de Chirinos – Cajamarca, 2019 [Tesis de grado, Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/175>
- Kuehl, R. O. (2000). *Design of experiments: Statistical principles of research design and analysis* (2nd ed). Duxbury/Thomson Learning. <https://archive.org/details/designofexperime0000kueh>
- Lenth, R. V., & Piaskowski, J. (2026). *emmeans: Estimated marginal means, aka least-squares means* [Manual]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.emmeans>
- Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed). Elsevier/Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63043-9>
- Mexal, J. G., & Landis, T. D. (1990). Target seedling concepts: Height and diameter. En R. Rose, S. J. Campbell, & T. D. Landis (Eds.), *Target seedling symposium: Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations* (pp. 17-35). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. <https://www.fs.usda.gov/treearch/pubs/45098>
- Patiño-Díez, J. F., & Smith-Quintero, R. (2008). Consideraciones sobre la dendroenergía bajo un enfoque sistémico. *Revista Energética*, (39), 19-28. <https://www.redalyc.org/pdf/1470/147020257003.pdf>
- Pinheiro, J., Bates, D., & R Core Team. (2025). *nlme: Linear and nonlinear mixed effects models* [Manual]. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.nlme>
- R Core Team. (2026). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rueda-Sánchez, A., Benavides-Solorio, J. D. D., Saenz-Reyez, J. T., Muñoz Flores, H. J., Prieto-Ruiz, J. Á., & Orozco Gutiérrez, G. (2018). CALIDAD DE PLANTA PRODUCIDA EN LOS VIVEROS FORESTALES DE NAYARIT. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(22), 58-73. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i22.350>
- Verbeke, G., & Molenberghs, G. (2000). *Linear Mixed Models for Longitudinal Data*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0300-6>