

Artículo

Respuesta de plántulas de *Theobroma cacao* L. a sustratos orgánicos e inoculación con *Pseudomonas* en vivero

Theobroma cacao L. seedling response to organic substrates and *Pseudomonas* inoculation under nursery conditions

Mercedes Carranza-Patiño ^{1*}, Vanessa Rivera-Castillo ², Robinson J. Herrera-Feijoo ³ y Jairo Palma-Zambrano ⁴

Cita: Carranza Patiño, M. S., Rivera-Castillo, V., Herrera-Feijoo, R. J., & Palma-Zambrano, J. (2026). Respuesta de plántulas de *Theobroma cacao* L. a sustratos orgánicos e inoculación con *Pseudomonas* en vivero. *Multidisciplinary Collaborative Journal*, 4(2), 102-119. <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n2/154>

Recibido: 25/02/2026
Revisado: 27/04/2026
Aceptado: 03/05/2026
Publicado: 17/05/2026



Copyright: © 2026 por los autores. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la [Licencia Creative Commons, Atribución-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ), Quevedo, Los Ríos, Ecuador; <https://orcid.org/0000-0002-0917-0415>

² Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UTEQ, Quevedo, Los Ríos, Ecuador; <https://orcid.org/0009-0005-0697-8100>; vanessa.rivera2015@uteq.edu.ec

³ Facultad de Ciencias Pecuarias, UTEQ, Quevedo, Los Ríos, Ecuador; <https://orcid.org/0000-0003-3205-2350>; rherreraf2@uteq.edu.ec

⁴ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UTEQ, Quevedo, Los Ríos, Ecuador; <https://orcid.org/0009-0002-8667-0939>, jpalmaz@uteq.edu.ec

* Correspondencia: mcarranza@uteq.edu.ec

 <https://doi.org/10.70881/mcj/v4/n2/154>

Resumen: *Theobroma cacao* L. es un cultivo de importancia económica global, cuya calidad de plántulas en vivero determina el éxito del establecimiento. Este estudio evaluó el efecto de dos sustratos orgánicos —humus de lombriz y abono de borrego— combinados con inoculación de rizobacterias comerciales (*Pseudomonas* spp.; 1×10^9 UFC mL⁻¹) sobre variables morfológicas, dinámica de crecimiento e índices de calidad de plántulas bajo condiciones de vivero. Se empleó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones ($n = 60$). Los datos se analizaron mediante ANOVA, prueba de Tukey, modelos lineales mixtos, índice de calidad de Dickson (DQI), tasas de crecimiento relativo (TCR) y correlaciones de Pearson. El tratamiento abono de borrego + *Pseudomonas* spp. registró la mayor altura (22,80 cm) y biomasa total (4,81 g) a los 45 DDT, además del mayor TCR en el periodo 30–45 DDT. El DQI fue superior en los tratamientos con inoculación (0,55–0,57) frente al testigo sin inoculante (0,39). Se evidenció correlación altamente significativa entre DQI y biomasa total ($r = 0,888$; $p < 0,001$). La combinación de abono de borrego con inoculante comercial representa una alternativa agroecológica prometedora para optimizar la calidad de plántulas de cacao en vivero.

Palabras clave: bioinsumos; cacao fino de aroma; índice de Dickson; modelo mixto; PGPR; tasa de crecimiento relativo.

Abstract: *Theobroma cacao* L. is a crop of global economic importance, whose seedling quality in nursery determines successful establishment. This study evaluated the effect of two organic substrates —vermicompost and sheep manure— combined with commercial rhizobacteria inoculation (*Pseudomonas* spp.; 1×10^9 CFU mL⁻¹) on morphological variables, growth dynamics, and seedling quality indices under nursery conditions. A completely randomized design was used with four treatments and three replications ($n = 60$). Data were analyzed using ANOVA, Tukey's test, linear mixed models, Dickson Quality Index (DQI), relative growth rates (RGR), and Pearson correlation matrices. The sheep manure + *Pseudomonas* spp.

treatment recorded the greatest height (22.80 cm) and total biomass (4.81 g) at 45 DAT, as well as the highest RGR during the 30–45 DAT period. DQI was superior in inoculated treatments (0.55–0.57) compared to the non-inoculated control (0.39). A highly significant correlation was found between DQI and total biomass ($r = 0.888$; $p < 0.001$). The combination of sheep manure with commercial inoculant represents a promising agroecological alternative to optimize cacao seedling quality in nursery conditions.

Keywords: bioinputs; Dickson quality index; fine-flavor cocoa; mixed model; PGPR; relative growth rate

1. Introducción

Theobroma cacao L. es uno de los cultivos tropicales de mayor relevancia económica global, con una producción mundial que supera los 5,8 millones de toneladas métricas anuales (ICCO, 2024). Ecuador ocupa una posición estratégica en este mercado al concentrar cerca del 63 % de las exportaciones mundiales de cacao fino de aroma, con envíos superiores a 471 000 toneladas métricas registradas durante 2024 (ANECACAO, 2024; MAG, 2024). Más de 100 000 familias campesinas ecuatorianas derivan su sustento directamente de esta cadena productiva, lo que confiere al cultivo una dimensión social inseparable de su relevancia económica (MAG, 2024). La sostenibilidad de esta cadena productiva depende, en parte, de la disponibilidad de plántulas de alta calidad fisiológica producidas bajo protocolos rigurosos de vivero (Sánchez-Mora et al., 2022).

La calidad fisiológica de las plántulas condiciona el prendimiento, la precocidad y la productividad futura en campo, por lo que su evaluación objetiva resulta indispensable en cualquier programa de producción de cacao (Sánchez-Mora et al., 2022). El Índice de Calidad de Dickson (DQI) constituye uno de los indicadores más robustos para cuantificar esta calidad de forma integral, al combinar biomasa total, esbeltez y proporción aérea/radicular en un único valor agrónomicamente interpretable (Dickson et al., 1960). Binotto et al. (2010) establecieron que valores de DQI superiores a 0,20 definen plántulas aptas para trasplante a campo definitivo en especies forestales y agrícolas tropicales. Las tasas de crecimiento relativo (TCR) complementan este análisis al capturar la dinámica temporal del desarrollo vegetal con mayor sensibilidad que las mediciones estáticas puntuales (Hunt, 1990).

La dinámica de crecimiento evaluada mediante TCR y el DQI depende en gran medida de las condiciones físico-químicas del sustrato utilizado durante la fase de vivero. Los sustratos orgánicos como el vermicompost aportan sustancias húmicas estabilizadas, microbiota benéfica activa y nutrientes de liberación progresiva que estimulan el desarrollo radicular y aéreo de las plántulas (Lazcano & Domínguez, 2011). El estiércol ovino compostado presenta una relación C/N entre 15 y 25, con nitrógeno total entre 1,5 % y 3,5 % y pH ligeramente alcalino, condiciones que favorecen la mineralización y la disponibilidad de nutrientes para la planta (Bernal et al., 2009; Kusvuran et al., 2021). Arteaga-Crespo et al. (2023) documentaron beneficios significativos del uso de fuentes orgánicas locales sobre el desarrollo de plántulas de *T. cacao*, lo que sustenta la pertinencia de evaluar estas enmiendas en condiciones de vivero tropical ecuatoriano.

Más allá del efecto del sustrato orgánico, la rizosfera de las plántulas constituye un espacio funcional donde las interacciones planta-microorganismo determinan la eficiencia en la absorción de nutrientes y la resistencia a estreses bióticos y abióticos (Backer et al., 2018). Las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR)

representan una alternativa biotecnológica con potencial demostrado en este contexto, y *Pseudomonas* spp. sobresale entre los géneros más estudiados por su capacidad para producir fitohormonas, solubilizar fosfatos, sintetizar sideróforos y expresar actividad ACC desaminasa (Backer et al., 2018). Bernal-Cabrera et al. (2022) confirmaron que cepas de *Pseudomonas putida* y especies filogenéticamente relacionadas expresan simultáneamente múltiples rasgos promotores del crecimiento en condiciones de rizosfera tropical. En el contexto específico del cacao, Sujayanand et al. (2025) identificaron cepas indígenas de *P. fluorescens* y *P. otitidis* con capacidad de promoción del crecimiento y actividad antagónica frente a *Phytophthora palmivora*, mientras que Miguez-Sierra et al. (2019) reportaron que *Pseudomonas chlororaphis* CP07 redujo significativamente la severidad de la pudrición negra en plántulas de *T. cacao*.

A pesar del potencial documentado de las PGPR y los sustratos orgánicos de manera individual, la información sobre su efecto combinado en la producción de plántulas de cacao bajo condiciones de vivero tropical ecuatoriano permanece limitada. La mayoría de estudios disponibles evalúan sustratos o bioinoculantes como factores independientes, sin examinar las interacciones sinérgicas entre la matriz orgánica y la comunidad microbiana inoculada sobre la dinámica temporal de crecimiento (Bernal-Cabrera et al., 2022). La ausencia de evaluaciones con índices integrados como el DQI y modelos estadísticos longitudinales en este tipo de experimentos dificulta la comparación robusta entre tratamientos y la transferencia de resultados a condiciones de campo (Binotto et al., 2010). Esta brecha metodológica y contextual justifica el diseño de estudios que aborden simultáneamente los efectos morfológicos, fisiológicos y de calidad bajo esquemas de inoculación combinada con sustratos orgánicos diferenciados.

Con base en esta brecha de conocimiento identificada, el presente estudio evaluó el efecto de dos sustratos orgánicos —humus de lombriz y abono de borrego— combinados con la inoculación de un bioproducto comercial a base de *Pseudomonas* spp. sobre variables morfológicas, dinámica temporal de crecimiento e índices integrados de calidad de plántulas de *T. cacao* L. en condiciones de vivero tropical en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Se hipotetizó que la combinación de sustrato orgánico con bioinoculante microbiano produciría plántulas con mayor biomasa, mejores índices de calidad y tasas de crecimiento relativo superiores frente a los tratamientos sin inoculación. Los resultados aportan evidencia cuantitativa para fundamentar recomendaciones técnicas en programas de producción sostenible de plántulas de cacao fino de aroma en la región tropical ecuatoriana.

2. Materiales y Métodos

2.1. Localización del experimento

La investigación se desarrolló bajo condiciones controladas de vivero en la provincia de Los Ríos, Ecuador, región caracterizada por clima tropical húmedo con temperaturas medias anuales de 24–28 °C y precipitaciones superiores a 2 000 mm anuales (Sánchez-Mora et al., 2022). Las plántulas se mantuvieron bajo aproximadamente 50 % de sombra mediante malla sarán, con riego manual diario para conservar la capacidad de campo del sustrato. Las actividades de laboratorio correspondientes a la reactivación y propagación bacteriana se ejecutaron en las instalaciones de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ).

2.2. Material vegetal

El material vegetal consistió en semillas de *T. cacao* L. seleccionadas por uniformidad de tamaño, apariencia morfológica y viabilidad aparente. Las semillas fueron sembradas en fundas de polietileno individuales que contenían los sustratos correspondientes a cada tratamiento, garantizando un desarrollo radicular independiente.

2.3. Sustratos orgánicos

Se utilizaron dos enmiendas orgánicas comerciales: humus de lombriz CRIBOSOL® (4 kg; registro AGROCALIDAD n.º 100-T-AGR-T; Cristóbal Bozmediano B., Riobamba, Ecuador) obtenido por vermicompostaje, y abono de borrego PUMAMAQUI COMPOST® (3 kg; 100 % materia orgánica de origen ovino). Los sustratos se mezclaron con tierra de monte en proporción 80:20 (v/v), conforme a Arteaga-Crespo et al. (2023).

Cabe precisar que en el presente estudio no se efectuó caracterización fisicoquímica directa de los sustratos. En consecuencia, los rangos referenciales se tomaron de la literatura: el humus de lombriz exhibe pH neutro (6,5–7,5), relación C/N inferior a 15 y materia orgánica entre 30 % y 50 % (Lazcano & Domínguez, 2011), mientras que el estiércol ovino compostado presenta pH ligeramente alcalino (7,0–8,0) y relación C/N entre 15 y 25 (Bernal et al., 2009). En tal sentido, «los abonos orgánicos presentan variabilidad en su composición en función de la materia prima y del proceso de transformación» (Bernal et al., 2009, p. 5445).

2.4. Bioinoculante microbiano

Se empleó un producto comercial del género *Pseudomonas* spp. (MICROBIOLAB EC, Ecuador; concentración inicial declarada 1×10^9 UFC mL⁻¹). El protocolo de manejo del inoculante se fundamentó en estándares internacionales: medio King B (King et al., 1954) para reactivación, y técnica de microgotas (Herigstad et al., 2001) para cuantificación de UFC. Las cuatro fases del protocolo se describen a continuación.

2.4.1. Reactivación en medio líquido

El medio de cultivo líquido se preparó por cada 500 mL de agua destilada con: peptona (6,00 g), K₂HPO₄ (0,75 g) y MgSO₄·7H₂O (0,75 g), ajustando pH a 7,2 antes de esterilización a 121 °C, 15 psi durante 20 min (King et al., 1954). El medio se inoculó con 50 µL de la solución bacteriana comercial y se incubó en agitador orbital por 48 h a temperatura ambiente.

2.4.2. Diluciones seriadas

Para obtener concentraciones de trabajo (10^{-6} a 10^{-9}), se aplicó dilución seriada decimal: 20 µL del cultivo reactivado se transfirieron a 980 µL de agua destilada estéril (dilución 10^{-1}) y se procedió sucesivamente hasta 10^{-9} con homogeneización en vórtex. Posteriormente, 10 µL de cada dilución final se inocularon en matraces con medio fresco e incubaron 48 h adicionales en agitación constante.

2.4.3. Conteo de colonias y validación

Se preparó medio sólido equivalente con adición de agar bacteriológico (7,50 g por 500 mL). Una vez solidificado en placas Petri, se aplicaron 10 µL de cada dilución mediante

microgotas por segmento (Herigstad et al., 2001). Las placas se sellaron con Parafilm® e incubaron 24 h, tras lo cual se realizó el recuento manual de colonias para calcular UFC mL⁻¹.

2.4.4. Preparación final del inóculo

Tras confirmar el recuento de UFC y la actividad biológica del cultivo, se seleccionaron colonias representativas para una última propagación en medio líquido estéril. Estas suspensiones finales se mantuvieron en agitación orbital por 48 h adicionales, con el propósito de asegurar una biomasa bacteriana activa, homogénea y en fase exponencial al momento del bioensayo. La inoculación de las plántulas se realizó inmediatamente después de esta preparación final, mediante aplicación directa de la suspensión bacteriana en la zona radicular al momento del establecimiento del experimento. Para cada plántula se aplicaron 20 µL de suspensión bacteriana a una concentración de 1×10⁸ UFC/mL, dispensada alrededor del cuello radicular, lo que favoreció el contacto directo entre la bacteria y el sistema radicular. Este método de aplicación facilita la colonización bacteriana del sistema radicular y la posterior interacción con los exudados radiculares, procesos fundamentales para la manifestación de los efectos promotores del crecimiento (Santoyo et al., 2021).

2.5. Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron cuatro tratamientos en un diseño completamente al azar (DCA) con tres repeticiones (Tabla 1). Cada repetición agrupó cinco plántulas como submuestras dentro de la unidad experimental, conforme a Gomez y Gomez (1984), con análisis estadístico sobre el promedio aritmético de las cinco plantas (n = 3 unidades experimentales por tratamiento; 60 plántulas totales).

Tabla 1

Composición de los tratamientos experimentales evaluados

Código	Composición del sustrato	Inoculación
T1	80 % tierra de monte + 20 % humus de lombriz	Con <i>Pseudomonas</i> spp.
T2	80 % tierra de monte + 20 % abono de borrego	Con <i>Pseudomonas</i> spp.
T3	80 % tierra de monte + 20 % humus de lombriz	Sin inoculación
T4	80 % tierra de monte + 20 % abono de borrego	Sin inoculación

Nota. Todos los tratamientos utilizaron tierra de monte como sustrato base (80 %). La inoculación se realizó con el bioinoculante comercial MICROBIOLAB EC a base de *Pseudomonas* spp. (1×10⁹ UFC mL⁻¹). Cada tratamiento contó con tres repeticiones (n = 60 plántulas totales).

2.6. Variables evaluadas

Las mediciones se realizaron a los 15, 30 y 45 días después del trasplante (DDT). Las variables aéreas incluyeron: altura de planta (cm), número de hojas verdaderas y

diámetro del tallo (mm). Las variables radiculares fueron: longitud de raíz (cm), volumen radicular (mL), peso fresco radicular (PFR, g) y peso seco radicular (PSR, g; secado a 65 °C hasta peso constante). Adicionalmente, se determinaron peso fresco aéreo (PFA), peso seco aéreo (PSA) y biomasa total (BT = PFR + PFA), conforme a Hunt (1990).

2.7. Índices de calidad de plántulas

Con el propósito de caracterizar de forma integral la calidad fisiológica de las plántulas, se calcularon tres índices ampliamente utilizados en estudios forestales y agronómicos. En primer lugar, el Índice de Esbeltez (IE) se calculó como el cociente entre la altura (cm) y el diámetro del tallo (mm), conforme a Iglesias-Trabado y Wilstermann (2008). En segundo lugar, la Relación Parte Aérea/Raíz (RAR) se determinó como el cociente entre PSA y PSR. Finalmente, el Índice de Calidad de Dickson (DQI), originalmente propuesto por Dickson et al. (1960), se calculó mediante la siguiente expresión:

$$DQI = PST / (IE + RAR)$$

donde PST corresponde al peso seco total (g), calculado como la suma de PSA y PSR. Conforme a Binotto et al. (2010), valores de DQI superiores a 0,20 indican plántulas de calidad agronómica aceptable para trasplante a campo.

2.8. Análisis de crecimiento - Tasas de crecimiento relativo (TCR)

Las tasas de crecimiento relativo en altura se calcularon mediante la fórmula clásica de Hunt (1990):

$$TCR = [\ln(H_2) - \ln(H_1)] / (t_2 - t_1)$$

donde H_1 y H_2 son las alturas en los tiempos t_1 y t_2 , expresada en $\text{cm cm}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Se calcularon TCR para los periodos 15–30 DDT, 30–45 DDT y 15–45 DDT, lo cual permite caracterizar tanto la fase de establecimiento inicial como la de crecimiento sostenido.

2.9. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados previa verificación de los supuestos del modelo lineal mediante las pruebas de Shapiro–Wilk (normalidad de residuales) y Levene (homogeneidad de varianzas) (Razali & Wah, 2011). Se aplicó análisis de varianza (ANOVA) de una vía empleando el promedio de las cinco plántulas por repetición como unidad experimental ($n = 3$) y, ante diferencias significativas, una prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha = 0,05$).

De manera complementaria, se ajustó un modelo lineal mixto para medidas repetidas sobre la variable altura, con tratamiento, tiempo (DDT) y su interacción como efectos fijos, y la unidad experimental como efecto aleatorio. Este enfoque, recomendado por Pinheiro y Bates (2000), permite gestionar adecuadamente la correlación temporal de las mediciones longitudinales y proporciona estimaciones más robustas que el ANOVA clásico para diseños con muestreo repetido.

Adicionalmente, se construyó una matriz de correlaciones de Pearson entre todas las variables morfológicas e índices de calidad evaluados, calculando los coeficientes r con sus respectivos valores p . Los cálculos se ejecutaron en Python 3.11 mediante las bibliotecas SciPy, statsmodels (Seabold & Perktold, 2010), pandas y seaborn para la visualización gráfica.

3. Resultados

En primer lugar, la verificación de los supuestos estadísticos mediante Shapiro–Wilk y Levene confirmó, para la mayoría de variables, normalidad de residuales y homogeneidad de varianzas ($p > 0,05$), lo cual validó la aplicación de análisis paramétricos.

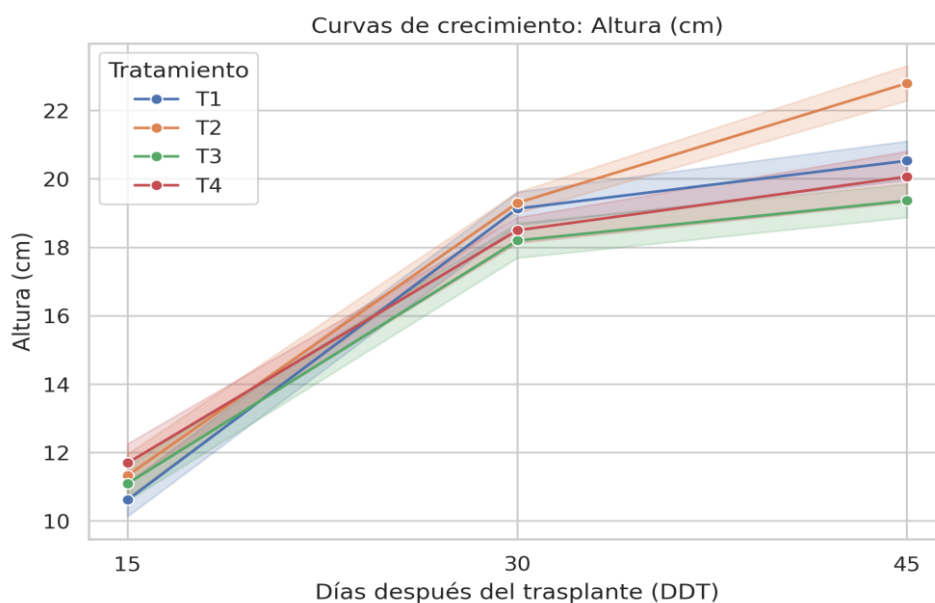
3.1. Crecimiento de la parte aérea

3.1.1. Altura de planta

Con respecto a la altura de planta, el ANOVA reveló diferencias significativas a los 45 DDT ($F = 4,15$; $p = 0,048$). El tratamiento T2 (abono de borrego + *Pseudomonas*) registró la mayor altura promedio ($22,80 \pm 0,17$ cm), superando estadísticamente al T3 ($19,37 \pm 1,12$ cm; Tukey $p = 0,042$). La curva de crecimiento (Figura 1) evidencia que las diferencias se acentuaron a partir de los 30 DDT, particularmente para el tratamiento T2.

Figura 1.

Curvas de crecimiento en altura de plántulas de *Theobroma cacao* bajo cuatro tratamientos a los 15, 30 y 45 DDT



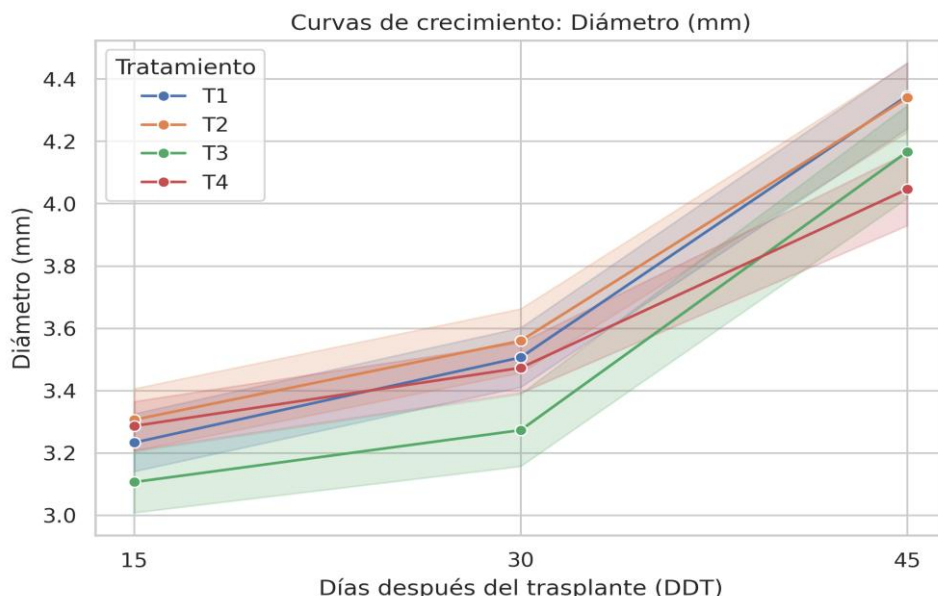
Nota. Las bandas sombreadas representan el intervalo de confianza al 95 % ($n = 3$). Códigos de tratamientos según la Tabla 1.

3.1.2. Diámetro del tallo

Por otra parte, el diámetro del tallo no presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en ninguna fecha de evaluación ($p > 0,05$). Sin embargo, se observó una tendencia numérica favorable a los tratamientos T1 (4,35 mm) y T2 (4,34 mm) frente a T3 (4,17 mm) y T4 (4,05 mm) a los 45 DDT (Figura 2).

Figura 2

Curvas de crecimiento en diámetro del tallo de plántulas de *Theobroma cacao* bajo cuatro tratamientos a los 15, 30 y 45 DDT



Nota. Las bandas sombreadas representan el intervalo de confianza al 95 % (n = 3).

3.1.3. Número de hojas

Asimismo, el número de hojas presentó comportamiento diferencial. Particularmente, a los 30 DDT se detectaron diferencias altamente significativas ($F = 23,33$; $p < 0,001$), con T1 (humus + *Pseudomonas*) presentando el mayor número ($4,87 \pm 0,12$ hojas) frente a T3 y T4 ($p < 0,01$). En contraste, a los 45 DDT esta diferencia se atenuó ($p = 0,115$), lo cual sugiere convergencia morfológica progresiva entre tratamientos. La síntesis de variables aéreas se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2.

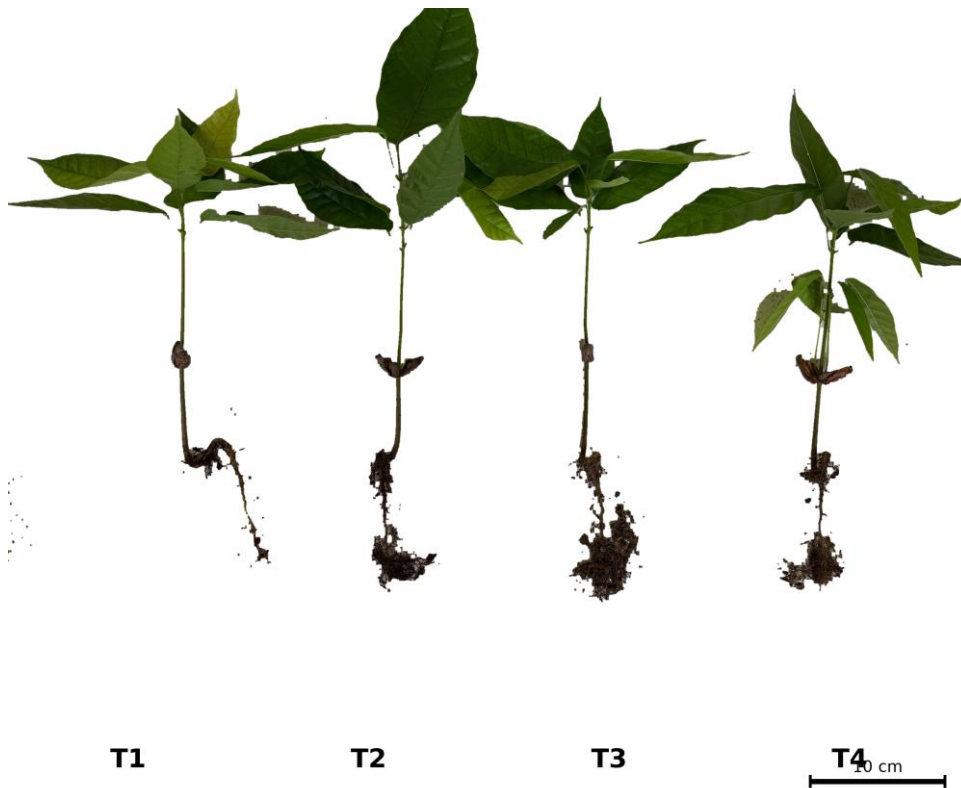
Variables morfológicas de la parte aérea en plántulas de *Theobroma cacao* a los 45 DDT

Tratamiento	Altura (cm)	N.º hojas	Diámetro (mm)
T1	20,53 ± 1,20 ab	7,27 ± 0,42 a	4,35 ± 0,12 ns
T2	22,80 ± 0,17 a	6,60 ± 0,40 a	4,34 ± 0,37 ns
T3	19,37 ± 1,12 b	6,47 ± 0,58 a	4,17 ± 0,14 ns
T4	20,07 ± 1,91 ab	6,33 ± 0,31 a	4,05 ± 0,08 ns
<i>p</i> -valor	0,048*	0,115 ns	0,302 ns

Nota. Media ± DE (n = 3). Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0,05$). * $p \leq 0,05$; ns: no significativo.

Figura 3.

Morfología comparativa de plántulas de *Theobroma cacao* L. a los 45 DDT bajo cuatro tratamientos experimentales



Nota. Plántulas representativas seleccionadas al azar. Códigos de tratamientos según la Tabla 1. Barra de escala = 10 cm.

3.2. Modelo lineal mixto para medidas repetidas en altura

Con el propósito de caracterizar la dinámica temporal del crecimiento controlando la correlación entre mediciones repetidas en cada unidad experimental, se ajustó un modelo lineal mixto para la variable altura. Los resultados (Tabla 3) revelaron un efecto altamente significativo del tiempo ($\beta = 0,330$; $p < 0,001$), confirmando un crecimiento sostenido en todas las unidades evaluadas. La interacción tratamiento \times tiempo no resultó significativa ($p > 0,05$) para ninguna combinación, lo cual indica que las pendientes de crecimiento no difirieron significativamente entre tratamientos durante el periodo evaluado, aunque la tendencia numérica favoreció a T2.

Tabla 3.

Resultados del modelo lineal mixto para altura: efectos fijos del tratamiento, tiempo y su interacción

Efecto	β	EE	z	p
Intercepto	6,849	1,378	4,970	< 0,001 ***
Tratamiento (T2 vs T1)	-0,504	1,949	-0,259	0,796 ns
Tratamiento (T3 vs T1)	1,107	1,949	0,568	0,570 ns

Tratamiento (T4 vs T1)	1,540	1,949	0,790	0,429 ns
Tiempo (DDT)	0,330	0,042	7,790	< 0,001 ***
T2 × DDT	0,052	0,060	0,863	0,388 ns
T3 × DDT	-0,055	0,060	-0,915	0,360 ns
T4 × DDT	-0,052	0,060	-0,859	0,390 ns

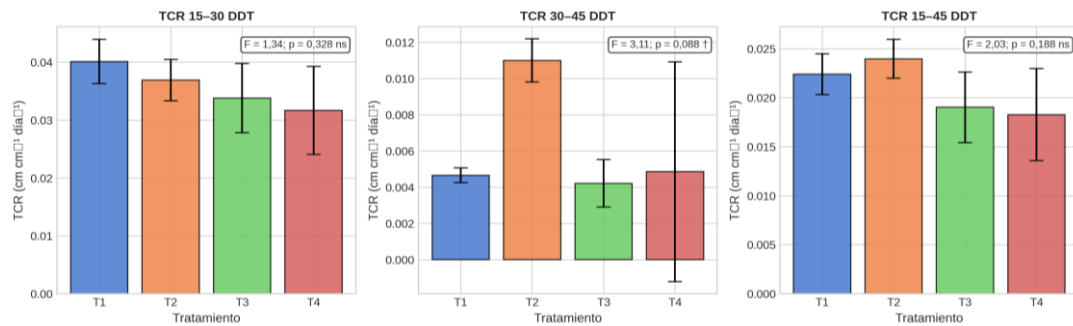
Nota. β = coeficiente de regresión; EE = error estándar; T1 fue tomado como categoría de referencia. Varianza del efecto aleatorio (unidad experimental) = 0,027. *** $p < 0,001$; ns: no significativo.

3.3. Análisis de crecimiento - Tasas de crecimiento relativo (TCR)

Con el propósito de caracterizar la dinámica de crecimiento, se calcularon las tasas de crecimiento relativo en altura para tres periodos de evaluación (Figura 4). Durante el periodo 15–30 DDT (fase de establecimiento), la TCR no difirió significativamente entre tratamientos ($F = 1,34$; $p = 0,328$). En el periodo 30–45 DDT, sin embargo, se observó una tendencia marginalmente significativa ($F = 3,11$; $p = 0,088$), con T2 destacándose con una TCR de $0,0110 \text{ cm cm}^{-1} \text{ día}^{-1}$, valor superior al doble del observado en T1 ($0,0047$), T3 ($0,0042$) y T4 ($0,0049$). Para el periodo completo (15–45 DDT), las TCR oscilaron entre $0,0183$ (T4) y $0,0240 \text{ cm cm}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (T2), sin diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,188$).

Figura 4.

Tasas de crecimiento relativo en altura por tratamiento y periodo de evaluación



Nota. Las barras representan medias \pm desviación estándar ($n = 3$). El símbolo † indica tendencia marginal ($p < 0,10$).

3.4. Desarrollo del sistema radicular

En relación con las variables radiculares, los análisis no detectaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos para longitud de raíz ($F = 2,80$; $p = 0,109$), volumen radicular ($F = 2,21$; $p = 0,165$), peso fresco radicular ($F = 1,25$; $p = 0,355$) ni peso seco radicular ($F = 1,09$; $p = 0,407$). No obstante, la tendencia favorable del T2 en peso fresco radicular ($3,77 \pm 1,52 \text{ g}$) frente a T4 ($2,47 \pm 0,50 \text{ g}$) representó una diferencia porcentual del 52,6 %. Los valores promedios se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

VARIABLES DEL SISTEMA RADICULAR DE PLÁNTULAS DE *Theobroma cacao* AL FINAL DEL PERIODO EXPERIMENTAL

Tratamiento	LR (cm)	VR (mL)	PFR (g)	PSR (g)
T1	13,93 ± 1,10	3,40 ± 0,20	2,76 ± 0,22	1,16 ± 0,42
T2	13,73 ± 0,46	3,40 ± 0,80	3,77 ± 1,52	1,25 ± 0,37
T3	13,00 ± 1,04	2,40 ± 0,53	2,85 ± 0,65	1,17 ± 0,26
T4	15,23 ± 1,10	3,13 ± 0,50	2,47 ± 0,50	0,80 ± 0,25
<i>p</i> -valor	0,109 ns	0,165 ns	0,355 ns	0,407 ns

Nota. LR = longitud de raíz; VR = volumen radicular; PFR = peso fresco radicular; PSR = peso seco radicular. Media ± DE (n = 3). ns: p > 0,05.

3.5. Biomasa aérea y biomasa total

Con respecto a la biomasa, el ANOVA detectó diferencias significativas en peso seco aéreo ($F = 6,65$; $p = 0,015$) y biomasa total ($F = 4,33$; $p = 0,043$). El tratamiento T2 registró los mayores valores $-3,56 \pm 0,30$ g en PSA y $4,81 \pm 0,42$ g en BT—, diferenciándose de T4 según Tukey ($p = 0,010$ y $p = 0,032$). Por consiguiente, la combinación de abono de borrego con inoculación bacteriana incrementó la biomasa seca aérea en 51 % respecto al tratamiento sin inoculación con la misma base orgánica.

3.6. Índices integrados de calidad de plántulas

El análisis de los índices integrados de calidad reveló patrones distintos para cada parámetro evaluado (Tabla 5). Específicamente, el Índice de Esbeltez (IE) osciló entre 4,71 (T3) y 5,30 (T2), sin diferencias significativas ($F = 1,69$; $p = 0,245$); estos valores son indicativos de plántulas con proporción adecuada entre crecimiento longitudinal y engrosamiento, pues IE inferior a 6 sugiere plántulas robustas (Iglesias-Trabado & Wilstermann, 2008). Por otra parte, la Relación Parte Aérea/Raíz (RAR) varió entre 2,94 (T3) y 3,39 (T2) sin diferencias significativas ($F = 0,28$; $p = 0,840$), valores compatibles con un balance adecuado entre desarrollo aéreo y radicular.

Tabla 5.

Índices integrados de calidad de plántulas de *Theobroma cacao* a los 45 DDT

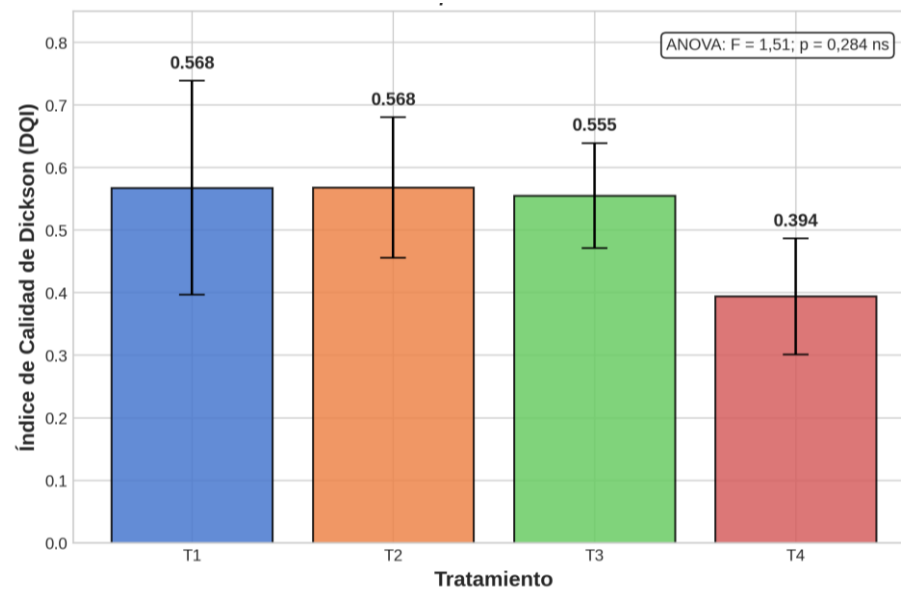
Tratamiento	IE (Altura/Diám.)	RAR (PSA/PSR)	DQI
T1	4,77 ± 0,21	3,03 ± 0,41	0,567 ± 0,171
T2	5,30 ± 0,49	3,39 ± 0,89	0,568 ± 0,112
T3	4,71 ± 0,15	2,94 ± 0,73	0,555 ± 0,084
T4	4,99 ± 0,43	3,32 ± 0,75	0,394 ± 0,093
<i>F</i>	1,69	0,28	1,51
<i>p</i> -valor	0,245 ns	0,840 ns	0,284 ns

Nota. IE = índice de esbeltez (Altura/Diámetro); RAR = relación parte aérea/raíz (PSA/PSR); DQI = índice de calidad de Dickson. Media ± DE (n = 3). ns: p > 0,05.

Con respecto al Índice de Calidad de Dickson (DQI), se observaron valores comparables para T1 (0,567), T2 (0,568) y T3 (0,555), todos superiores al T4 (0,394), aunque sin diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($F = 1,51$; $p = 0,284$) (Figura 5). Cabe destacar que todos los tratamientos superaron ampliamente el umbral mínimo de calidad agronómica de 0,20 propuesto por Binotto et al. (2010), lo cual indica que las plántulas de los cuatro tratamientos cumplen los criterios técnicos de calidad para trasplante a campo definitivo.

Figura 5

Índice de calidad de Dickson en plántulas de *Theobroma cacao* a los 45 DDT



Nota. Las barras representan medias \pm desviación estándar ($n = 3$). Línea discontinua hipotética en $DQI = 0,20$ indica el umbral mínimo de calidad agronómica según Binotto et al. (2010).

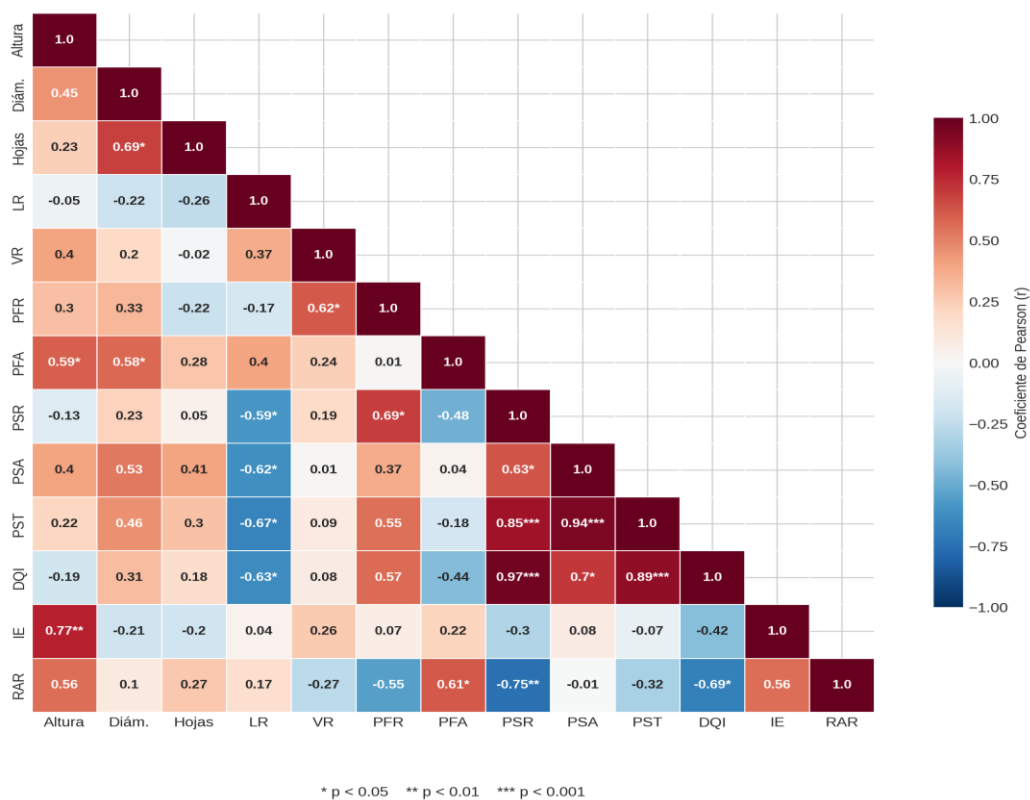
3.7. Análisis de correlaciones entre variables morfológicas e índices de calidad

La matriz de correlaciones de Pearson (Figura 6) reveló asociaciones estadísticamente significativas entre múltiples variables. En primer lugar, el Índice de Calidad de Dickson (DQI) mostró correlaciones altamente significativas y positivas con peso seco radicular ($r = 0,967$; $p < 0,001$), peso seco total ($r = 0,888$; $p < 0,001$), biomasa total ($r = 0,888$; $p < 0,001$) y peso seco aéreo ($r = 0,705$; $p = 0,011$). En contraste, el DQI correlacionó negativamente con longitud de raíz ($r = -0,627$; $p = 0,029$) y la relación aérea/raíz ($r = -0,687$; $p = 0,014$).

De manera complementaria, la altura de planta correlacionó fuertemente con el índice de esbeltez ($r = 0,775$; $p = 0,003$) y el diámetro mostró correlación significativa con número de hojas ($r = 0,686$; $p = 0,014$). Estos hallazgos confirman que las variables de biomasa y los índices integrados constituyen los mejores indicadores de la calidad fisiológica global de las plántulas.

Figura 6

Matriz de correlaciones de Pearson entre variables morfológicas e índices de calidad de plántulas de *Theobroma cacao* L.



Nota. Coeficientes de correlación de Pearson (n = 12). LR = longitud de raíz; VR = volumen radicular; PFR/PFA = peso fresco radicular/aéreo; PSR/PSA = peso seco radicular/aéreo; PST = peso seco total; DQI = índice de Dickson; IE = índice de esbeltez; RAR = relación aérea/raíz. * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

4. Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la interacción entre sustratos orgánicos y la inoculación con un bioproducto comercial a base de *Pseudomonas* spp. influye de manera diferencial sobre el crecimiento inicial de plántulas de cacao. Particularmente, el tratamiento T2 (abono de borrego + *Pseudomonas*) superó consistentemente a los demás en altura, biomasa total y tasa de crecimiento relativo durante el periodo de mayor demanda fisiológica (30–45 DDT). De acuerdo con Backer et al. (2018), las rizobacterias promotoras del crecimiento estimulan el desarrollo vegetal mediante producción de fitohormonas, solubilización de nutrientes y mejora en la absorción mineral, mecanismos que podrían explicar los resultados observados.

La superioridad del tratamiento T2 frente al T4 en peso seco aéreo (incremento del 51 %) y biomasa total (incremento del 52 %) constituye evidencia directa del efecto del bioinoculante. La aplicación del modelo lineal mixto confirmó el efecto altamente significativo del tiempo (p < 0,001), validando una dinámica de crecimiento sostenida en todos los tratamientos. Aunque la interacción tratamiento × tiempo no alcanzó significancia estadística, la tendencia numérica favoreció a T2, particularmente durante

el periodo 30–45 DDT, en el que su TCR duplicó la de los demás tratamientos. En este sentido, Bernal-Cabrera et al. (2022) documentaron que cepas de *Pseudomonas putida* y especies próximas exhiben rasgos clave para promoción del crecimiento, tales como síntesis de IAA, solubilización de fosfato tricálcico y producción de sideróforos.

Los índices integrados de calidad aportaron información complementaria de gran valor diagnóstico. Específicamente, los valores de DQI obtenidos (0,39–0,57) superan ampliamente el umbral mínimo de 0,20 propuesto por Binotto et al. (2010) como indicador de calidad agronómica aceptable, lo cual confirma que las plántulas de los cuatro tratamientos resultan aptas para trasplante a campo. No obstante, el T4 (0,39) presentó el menor valor, sugiriendo una calidad fisiológica relativamente inferior pese a no diferir estadísticamente de los demás tratamientos. Estas observaciones coinciden con lo reportado por Sáenz Reyes et al. (2014), quienes señalan que el DQI constituye un indicador robusto y multidimensional de la calidad de plántulas en especies forestales tropicales.

El análisis de correlaciones reveló asociaciones de gran relevancia metodológica. Específicamente, la correlación altamente significativa entre DQI y peso seco radicular ($r = 0,967$; $p < 0,001$) confirma que la biomasa radicular es el principal componente determinante de la calidad fisiológica de plántulas en esta especie, hallazgo coincidente con los reportes de Mexal y Landis (1990) en estudios clásicos sobre calidad de plántulas forestales. De forma complementaria, la correlación negativa entre DQI y relación aérea/raíz ($r = -0,687$; $p = 0,014$) confirma que un balance equilibrado entre el sistema aéreo y radicular es indispensable para alcanzar plántulas vigorosas.

En el caso específico del cacao, investigaciones recientes han demostrado la efectividad de *Pseudomonas* spp. en promoción del crecimiento. Concretamente, Sujayanand et al. (2025) aislaron seis cepas indígenas identificadas como *P. fluorescens*, *P. otitidis* y *Stutzerimonas stutzeri*, con actividad antagónica contra *Phytophthora palmivora* y capacidad de solubilización de fosfato. De forma análoga, Miguelez-Sierra et al. (2019) reportaron que *Pseudomonas chlororaphis* CP07 redujo la pudrición negra en plántulas. En consecuencia, los bioinoculantes a base de *Pseudomonas* spp. ofrecen beneficios duales: promoción del crecimiento y protección sanitaria preventiva.

Con respecto al sustrato base, la superioridad del abono de borrego inoculado respecto al humus de lombriz inoculado puede atribuirse a diferencias en la composición química y la cinética de liberación de nutrientes. El estiércol ovino compostado presenta una relación C/N cercana a 11 y nitrógeno total entre 1,5 % y 3,5 %, condiciones que favorecen una mineralización más rápida y una mayor disponibilidad de N asimilable durante la fase activa de crecimiento (Kusvuran et al., 2021). El humus de lombriz, aunque rico en sustancias húmicas y microbiota benéfica, exhibe una cinética de liberación de nutrientes más lenta, lo que puede retrasar su efecto sobre el crecimiento en periodos de evaluación cortos como el del presente estudio (Lazcano & Domínguez, 2011). Esta diferencia en la disponibilidad temporal de nitrógeno podría haber potenciado la respuesta de las plántulas al bioinoculante en el tratamiento T2, dado que *Pseudomonas* spp. expresa con mayor eficiencia sus mecanismos promotores del crecimiento en sustratos con mayor disponibilidad de carbono y nitrógeno lábil (Bernal-Cabrera et al., 2022)

Resulta oportuno reconocer las limitaciones metodológicas del presente estudio. En primer lugar, la caracterización molecular de la cepa bacteriana mediante secuenciación 16S rRNA no fue realizada, limitando la comparación específica con otros estudios. En segundo término, no se efectuó caracterización fisicoquímica directa de los sustratos, aunque esta limitación fue abordada con rangos referenciales de literatura especializada. En tercer lugar, la evaluación se circunscribió a 45 DDT, lo cual podría haber subestimado efectos tardíos sobre el sistema radicular. Además, el número de repeticiones ($n = 3$) limita el poder estadístico, particularmente para variables radiculares con alta variabilidad biológica. Por consiguiente, investigaciones futuras deberían contemplar mayor número de repeticiones, periodos extendidos (90–120 DDT), caracterización molecular del inóculo, análisis fisicoquímico de sustratos y validación bajo condiciones de campo.

Desde una perspectiva agronómica, los hallazgos respaldan la integración de bioinsumos microbianos y sustratos orgánicos como estrategia viable para la producción sustentable de plántulas de cacao. Rouphael y Colla (2020) sostienen que los bioestimulantes constituyen una herramienta prometedora para transitar hacia una agricultura de bajo impacto ambiental. Por consiguiente, la optimización de estas tecnologías podría contribuir a la reducción del uso de fertilizantes sintéticos y al fortalecimiento de la cadena productiva del cacao fino de aroma ecuatoriano.

5. Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran que la calidad de las plántulas de *Theobroma cacao* L. en vivero puede mejorarse significativamente mediante la integración de sustratos orgánicos y bioinoculantes microbianos. El tratamiento basado en abono de borrego con inoculación de *Pseudomonas* spp. promovió el mayor desarrollo vegetativo, alcanzando 22,80 cm de altura, 4,81 g de biomasa total y la tasa de crecimiento relativo más elevada durante el periodo 30–45 DDT ($0,0110 \text{ cm cm}^{-1} \text{ día}^{-1}$). El modelo lineal mixto confirmó que el tiempo ejerce un efecto determinante sobre el crecimiento ($p < 0,001$), independientemente del tratamiento aplicado.

El Índice de Calidad de Dickson evidenció que todos los tratamientos produjeron plántulas aptas para trasplante ($\text{DQI} > 0,20$); sin embargo, el tratamiento con abono de borrego sin inoculación mostró el desempeño más limitado ($\text{DQI} = 0,394$), lo que sugiere que tanto la fuente orgánica como la inoculación bacteriana contribuyen de manera complementaria a la calidad fisiológica final. Las correlaciones altamente significativas entre DQI y biomasa total ($r = 0,888$; $p < 0,001$) y entre DQI y peso seco radicular ($r = 0,967$; $p < 0,001$) respaldan la utilidad del DQI como indicador integrado y confiable en programas de producción de cacao.

Desde una perspectiva agroecológica, la combinación de insumos orgánicos con bioinoculantes validados representa una alternativa viable y sostenible para optimizar los sistemas de producción de plántulas. No obstante, investigaciones futuras deberían abordar la caracterización molecular de la cepa bacteriana, el análisis fisicoquímico de los sustratos, la extensión del periodo de evaluación hasta los 90–120 DDT y la validación de estos resultados bajo condiciones de campo definitivo.

Contribución de los autores: Conceptualización, M-C-P, V-R-C; análisis formal, V-R-C, R-J-H-F, J-P-Z; investigación V-R-C, R-J-H-F; recursos M-C-P, V-R-C; redacción del

borrador original, M-C-P, J-P-Z; redacción, revisión y edición M-C-P, J-P-Z, R-J-H-F; supervisión, M-C-P. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Agradecimientos: Los autores expresan su gratitud a la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo (UTEQ) por proveer las instalaciones del vivero y los laboratorios donde se desarrolló la investigación. Asimismo, se reconoce el apoyo técnico y la participación directa en la ejecución del trabajo experimental de los estudiantes Yessenia Lilibeth Bayas Domínguez, Leiver Alexander Domínguez Díaz, Elizabeth Fernanda Hidalgo García; Jacinta Mercedes Intriago Loor; Jafet Augusto La Rosa, Jalixa Monserrate Varela Cedeño, cuya colaboración en la toma de datos, el manejo del bioensayo y el procesamiento de muestras resultó fundamental para la culminación exitosa del estudio.

Financiamiento: Esta investigación no ha recibido financiación externa

Declaración de disponibilidad de datos: Los datos están disponibles previa solicitud a los autores de correspondencia: mcarranza@uteq.edu.ec

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Referencias Bibliográficas

- Arteaga-Crespo, Y., Pentón-Fernández, G., Hernández-Rodríguez, A., & Acebo-Guerrero, Y. (2023). Beneficios de fuentes locales de nutrientes e inoculantes micorrízicos en microinjertos de *Theobroma cacao* L. *Cultivos Tropicales*, 44(4), e03. <https://www.redalyc.org/journal/1932/193279251002/html/>
- Asociación Nacional de Exportadores de Cacao. (2024). Estadísticas de exportación de cacao ecuatoriano 2024. ANECACAO. <https://www.anecacao.com/estadisticas>
- Backer, R., Rokem, J. S., Ilangumaran, G., Lamont, J., Praslickova, D., Ricci, E., Subramanian, S., & Smith, D. L. (2018). Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Bernal-Cabrera, P., Rojas-Espinoza, M., & Pardo-Núñez, J. (2022). *Pseudomonas putida* and its close relatives: Mixing and mastering the perfect tune for plants. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(9–10), 3351–3364. <https://doi.org/10.1007/s00253-022-11881-7>
- Binotto, A. F., Lúcio, A. D. C., & Lopes, S. J. (2010). Correlations between growth variables and the Dickson quality index in forest seedlings. *Cerne*, 16(4), 457–464. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000400005>
- 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>

- Gomez, K. A., & Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research* (2.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Herigstad, B., Hamilton, M., & Heersink, J. (2001). How to optimize the drop plate method for enumerating bacteria. *Journal of Microbiological Methods*, 44(2), 121–129. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00241-4](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00241-4)
- Hunt, R. (1990). *Basic growth analysis: Plant growth analysis for beginners*. Unwin Hyman.
- ICCO. (2024). *Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. L, No. 1*. International Cocoa Organization. <https://www.icco.org/statistics/>
- Iglesias-Trabado, G., & Wilstermann, D. (2008). *Eucalyptus universalis: Global cultivated eucalypt forests map*. GIT Forestry Consulting.
- King, E. O., Ward, M. K., & Raney, D. E. (1954). Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescin. *The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 44(2), 301–307.
- Kusvuran, A., Nazli, R. I., & Kusvuran, S. (2021). The effects of different organic amendments on soil properties and plant growth. *Journal of Plant Nutrition*, 44(15), 2293–2307. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1881552>
- Lazcano, C., & Domínguez, J. (2011). The use of vermicompost in sustainable agriculture: Impact on plant growth and soil fertility. En M. Miransari (Ed.), *Soil nutrients* (pp. 1–23). Nova Science Publishers.
- Mexal, J. G., & Landis, T. D. (1990). Target seedling concepts: Height and diameter. En *Target seedling symposium: Proceedings, combined meeting of the Western Forest Nursery Associations* (pp. 17–35). USDA Forest Service.
- Miguelé-Sierra, Y., Acebo-Guerrero, Y., El Jaziri, M., Bertin, P., & Hernández-Rodríguez, A. (2019). *Pseudomonas chlororaphis* CP07 strain reduces disease severity caused by *Phytophthora palmivora* in genotypes of *Theobroma cacao*. *European Journal of Plant Pathology*, 155(4), 1133–1143. <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01842-8>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2024). Ecuador continuará como el principal exportador de cacao fino de aroma. MAG. <https://www.agricultura.gob.ec/ecuador-continuara-como-el-principal-exportador-de-cacao-fino-de-aroma/>
- Pinheiro, J. C., & Bates, D. M. (2000). *Mixed-effects models in S and S-PLUS*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b98882>
- Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro–Wilk, Kolmogorov–Smirnov, Lilliefors and Anderson–Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2(1), 21–33.
- Rouphael, Y., & Colla, G. (2020). Toward a sustainable agriculture through plant biostimulants: From experimental data to practical applications. *Agronomy*, 10(10), 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>
- Santoyo, G., Guzmán-Guzmán, P., Parra-Cota, F. I., Santos-Villalobos, S., Orozco-Mosqueda, M. del C., & Glick, B. R. (2021). Plant growth stimulation by microbial consortia. *Agronomy*, 11(2), 219. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020219>

- Sáenz Reyes, J. T., Villaseñor Ramírez, F. J., Muñoz Flores, H. J., Rueda Sánchez, A., & Prieto Ruíz, J. Á. (2014). Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. Folleto Técnico Núm. 25. INIFAP–CIRPAC, México.
- Sánchez-Mora, F. D., Zambrano-Montes, S., Vera-Chang, J., Ramos-Remache, R., Garcés-Fiallos, F. R., & Rivera-Flor, G. (2022). Agroforestry systems for sustainable cocoa (*Theobroma cacao* L.) production in the Ecuadorian Amazon. *Agronomy*, 12(4), 950. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040950>
- Seabold, S., & Perktold, J. (2010). Statsmodels: Econometric and statistical modeling with Python. Proceedings of the 9th Python in Science Conference, 92–96. <https://doi.org/10.25080/ajora-92bf1922-011>
- Sujayanand, G. K., Reddy, P. N., Kumar, N. R., Krishnan, H. H., Ahmed, S., Kumar, K., Vardhan, V. H., Sai, M. R., & Akhtar, J. (2025). Indigenous plant growth-promoting rhizobacteria for cocoa growth enhancement and Phytophthora pod rot management in coastal Andhra Pradesh, India. *BMC Plant Biology*, 25, 1212. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-07166-6>