



## Evaluación de sustratos regionales y fertilizantes para la producción de plántulas de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) †

### [Assessment of regional substrates and fertilizers for oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings production]

Katia Jazmín Romero-Bautista<sup>1</sup>, David Jesús Palma-López<sup>1\*</sup>,  
César Jesús Vázquez-Navarrete<sup>1</sup>, José Jesús Obrador-Olán<sup>1</sup>,  
Winston Vlaminc<sup>2</sup>, Arnulfo Aldrete<sup>3</sup> and Laurene Feintrenie<sup>4,5,6</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, Periférico Carlos A. Molina S/N.  
86500, H. Cárdenas, Tabasco, México. Email: [romero.katia@colpos.mx](mailto:romero.katia@colpos.mx),  
[dapalma@colpos.mx](mailto:dapalma@colpos.mx), [vcesar@colpos.mx](mailto:vcesar@colpos.mx), [obradoro@colpos.mx](mailto:obradoro@colpos.mx)

<sup>2</sup>PalmElit SAS. Parc Agropolis, 2214 Bd de la Lironde, 34980 Montferrier sur Lez,  
France. Email: [vlamincwinston@gmail.com](mailto:vlamincwinston@gmail.com)

<sup>3</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, km 36.5, CP. 56264. Carretera  
México-Texcoco, Estado de México, México. Email: [aaldrete@colpos.mx](mailto:aaldrete@colpos.mx)

<sup>4</sup>Cirad. Tetis, Univ.Montpellier, 34000, Montpellier, France. Email:  
[laurene.feintrenie@cirad.fr](mailto:laurene.feintrenie@cirad.fr)

<sup>5</sup>CATIE. Turrialba, C.P. 30501, Cartago, Costa Rica.

<sup>6</sup>ECOSUR. Av. Rancho Poligono 2-A, Cd. Industrial, Lerma, C.P. 24500, Campeche,  
México

\*Corresponding author

## SUMMARY

**Background:** The use of regional waste as a substrate to produce oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) seedlings represents a sustainable alternative in the pre-nursery stage, reducing dependence on commercial substrates. **Objective:** To evaluate the effect of different regional substrates and fertilizers on the growth and development of oil palm seedlings. **Methodology:** The study mainly involved replacing the commercial substrate, whose main component was peat moss. Seven substrates made from regional waste were evaluated: Control: Peat : *Eucalyptus* spp. bark (3:2); S1: Oil palm empty fruit bunches : peat moss: perlite : vermiculite (3:1:0.5:0.5); S2: Oil palm empty fruit bunches : *Cedrela odorata* sawdust : palm kernel shell charcoal : *Theobroma cacao* husk (3:1:0.5:0.5); S3: *Cedrela odorata* sawdust : peat moss : palm kernel shell charcoal : *Theobroma cacao* husk (3:1:0.5:0.5); S4: *Theobroma cacao* husk : *Cedrela odorata* sawdust : palm kernel shell charcoal (3:1.5:0.5); S5: *Eucalyptus* spp. bark : *Theobroma cacao* husk : *Cedrela odorata* sawdust (3:1:1); S6: Coconut coir : *Theobroma cacao* husk : *Cedrela odorata* sawdust (3:1:1). In addition, three different types of fertilizers were tested: controlled-release fertilizer, water-soluble fertilizer, and biofertilizer with mycorrhizae. Plant growth and development were evaluated based on height and stem diameter. **Results:** The Control, S4, and S6 substrates with controlled-release fertilizer showed the greatest growth in height, while the Control and S4 substrates had the highest increase in stem diameter. The regional substrates had lower production cost compared to the Control substrate. **Implications:** The regional substrates and fertilizers were evaluated only during the prenursery stage, using tubes for a period of three months. **Conclusions:** This study identified sustainable substrate alternatives for oil palm seedlings production. **Key words:** Peat moss; regional waste; morphology; cost; prenursery.

## RESUMEN

**Antecedentes:** El uso de residuos regionales como sustrato para la producción de plántulas de palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) representa una alternativa sostenible en la etapa de previvero, reduciendo la dependencia de sustratos comerciales. **Objetivo:** Evaluar el efecto de diferentes sustratos regionales y fertilizantes sobre el crecimiento y

† Submitted December 23, 2024 – Accepted October 17, 2025. <http://doi.org/10.56369/tsaes.6367>



Copyright © the authors. Work licensed under a CC-BY 4.0 License. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

ISSN: 1870-0462.

ORCID = K. J. Romero-Bautista: <http://orcid.org/0009-0004-6462-7176>; D. J. Palma-López: <http://orcid.org/0000-0002-9606-0379>; C. J. Vázquez-Navarrete: <http://orcid.org/0000-0003-1071-6232>; J. J. Obrador-Olán: <http://orcid.org/0000-0003-2233-3431>; W. Vlaminc: <http://orcid.org/0009-0005-2083-5456>; A. Aldrete: <https://orcid.org/0000-0002-6995-8490>; L. Feintrenie: <http://orcid.org/0000-0003-1621-396X>

desarrollo de plántulas de palma de aceite. **Metodología:** El estudio consistió principalmente en sustituir el sustrato comercial cuyo componente principal fue la turba de musgo. Se evaluaron siete sustratos elaborados con residuos regionales (Testigo: turba : Fino de eucalipto (3:2); S1: Raquis de palma de aceite : turba : perlita : vermiculita (3:1:0.5:0.5); S2: Raquis de palma de aceite: aserrín de cedro: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S3: Aserrín de cedro: turba: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S4: Cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo (3:1.5:0.5); S5: Fino de eucalipto: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1) y S6: Fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1). Además, se probaron tres diferentes tipos de fertilizantes: Fertilizante de liberación controlada, fertilizante hidrosoluble y biofertilizante con micorrizas. Se evaluó el crecimiento y desarrollo de las plantas a través de la altura y el diámetro de tallo. **Resultados:** El sustrato Testigo, S4 y S6 con fertilizante de liberación controlada presentaron el mayor desarrollo en la variable altura, mientras que el sustrato Testigo y S4, el mayor desarrollo en la variable diámetro. Los sustratos regionales resultaron tener un costo de producción menor comparado con el sustrato Testigo. **Implicaciones:** Los sustratos regionales y fertilizantes fueron evaluados únicamente en la etapa de previvero, utilizando tubetes durante un periodo de tres meses. **Conclusiones:** En este estudio se encontraron alternativas de sustratos sostenibles para la producción de palma de aceite.

**Palabras Clave:** turba de musgo; residuos regionales; morfología; costo; previvero.

## INTRODUCCIÓN

La palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq.) es la principal fuente de aceite vegetal a nivel mundial, y su cultivo representa una actividad de gran relevancia económica en los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche y Veracruz (FEMEXPALMA, 2024; SIAP, 2024). La expansión de la superficie cultivada ha impulsado un creciente interés por optimizar las prácticas de producción de este cultivo estratégico. En 2023 en Tabasco este cultivo ocupó el tercer lugar en posicionamiento por superficie establecida con 29,010.34 hectáreas después del maíz, caña de azúcar y cacao (FEMEXPALMA, 2024). Tanta es su importancia hoy en día que, en México, a partir de 2023, se puso en marcha el proyecto OptiPalMex "Optimización Inclusiva de las Producciones de la Palma Aceitera Mexicana", financiado por el gobierno francés. Este proyecto tiene como objetivo establecer un modelo de producción sostenible que combine la productividad de la palma de aceite con beneficios sociales, ambientales y agroecosistémicos, promoviendo la conservación y la biodiversidad de especies (cultivos asociados) en las parcelas y paisajes a través de la innovación y la organización de los actores clave del sector (FEMEXPALMA, 2023).

Entre las actividades de OptiPalMex se encuentra el establecimiento de una red de viveristas y agricultores líderes, dirigida a fortalecer el sector palmero de manera sostenible en Chiapas, Tabasco y Campeche. En este contexto, el proceso de producción de plántulas en vivero constituye un elemento esencial para garantizar el éxito de las plantaciones, y la selección de sustratos con características fisicoquímicas apropiadas juega un papel crucial en el buen crecimiento y desarrollo de las plantas (Lazcano-Bello *et al.*, 2021). Sin embargo, el sustrato comercial como la turba de musgo, aunque eficaz, y dado que es un producto de importación, es costoso y de acceso limitado para muchos productores. Además, debido a su capacidad para actuar como fuente de carbono, las turberas están bajo creciente presión en varios países para reducir o

eliminar su uso debido a las preocupaciones sobre el cambio climático (USGS, 2024).

La necesidad de reducir los costos de producción sin afectar el rendimiento ha incentivado la búsqueda de alternativas locales, sostenibles y accesibles (Haase *et al.*, 2015), entre las cuales destacan los residuos agrícolas y agroindustriales como insumos potenciales. En este contexto, el presente estudio planteó la hipótesis de que en Tabasco existen residuos orgánicos que pueden ser utilizados para la elaboración de sustratos regionales con potencial para la producción de plántulas de palma de aceite, cuyas propiedades podrían ofrecer beneficios en comparación con el sustrato comercial.

Así mismo, la fertilización en vivero es necesaria, especialmente para producir plantas en contenedor donde el desarrollo de raíces es limitado o el aporte de nutrientes es nulo o bajo (Basave-Villalobos *et al.*, 2020). Después el riego, la fertilización es la práctica cultural que tiene un mayor impacto en la calidad de las plantas (Escamilla-Hernández *et al.*, 2015), por ello, se planteó evaluar tres tipos de fertilizantes (fertilizante de liberación controlada, hidrosoluble y biofertilizante con micorrizas).

El objetivo fue evaluar el crecimiento de *Elaeis guineensis* en etapa de previvero durante 3 meses, utilizando sustratos elaborados a partir de residuos provenientes de la agricultura, el sector forestal y la agroindustria y tres tipos de fertilizantes.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del estudio

El experimento se realizó en el vivero de la empresa Prolade S.A.P.I. de C.V. "La Razón", localizado en las coordenadas geográfica 17° 49' 38.9" N y 93° 36' 36.1" O, en carretera Tierra Nueva-Francisco Rueda en el municipio de Huimanguillo Tabasco. El clima de la zona es cálido húmedo, con temperatura media

mensual de 25.76°C, precipitación media anual de 2819 mm (LARC-POWER, 2022).

### Semillas y sustratos

Se utilizaron semillas pregerminadas de palma de aceite, variedad DExLM altamente productivas certificadas procedentes de PalmElit-Cirad®. La germinación final de las semillas ocurrió el 04 de mayo de 2024 en el estadio fenológico 009, hasta terminar la etapa de previvero durante los tres meses posteriores de la germinación. Se evaluaron siete sustratos regionales (Tabla 1), de los cuales el Testigo es considerado como sustrato comercial debido a la mayor proporción de turba de musgo.

### Fertilizantes

El experimento incluyó la aplicación de 3 tipos de fertilizantes; fertilizante de liberación controlada (Multicote 8 (18-06-12+2MGO)), fertilizante hidrosoluble (Poly-feed 20-30-10) y biofertilizante (FOSFONAT).

La aplicación del fertilizante de liberación controlada (FLC) se realizó en la preparación de los sustratos. Se adicionaron 6 g L<sup>-1</sup> de Multicote 8 (18-06-12+2MGO) en cada uno de los sustratos a evaluar, con una dosis específica de 1 g de FLC por tubete.

La aplicación del fertilizante hidrosoluble se realizó a partir de la aparición de dos hojas (12 de junio de 2024) y se hizo vía foliar con una aspersora manual de mochila con dosis de 5 g de Poly-feed 20-30-10 por cada litro de agua, se aplicó a razón de 2.5 mL de solución/plántula. Esta aplicación se realizó cada 15 días hasta el término del experimento.

La aplicación del biofertilizante (FOSFONAT) se realizó en el sustrato, además de una imbibición de las semillas en solución con microorganismos del producto, a una concentración de 1 g L<sup>-1</sup> durante 1 minuto. Se utilizó una dosis de 2 g de biofertilizante por kilogramo de semilla, con el fin de favorecer la adherencia de los microorganismos a la superficie de las semillas. Se aplicó 0.1 g de biofertilizante FOSFONAT con micorizas por litro de sustrato.

### Manejo de la producción

Para todos los tratamientos se aplicó 0.1 g L<sup>-1</sup> del biofungicida Bactiva al sustrato previo a la siembra de la semilla.

El inicio del experimento fue el 04 de mayo de 2024 y finalizó el 25 de julio de 2024.

La planta se desarrolló durante un periodo de 11 semanas. Se utilizaron tubetes forestales de 160 cm<sup>3</sup>.

Cada tratamiento se colocó en charolas sobre una mesa al centro del área de producción la cual estuvo protegida con malla sombra del 70% color negro. Se aplicó riego dos veces al día las primeras dos semanas y posteriormente un riego diario.

### Propiedades químicas de los sustratos al finalizar el experimento de campo

Se determinaron las propiedades de los sustratos al finalizar el experimento con el objetivo de evaluar los cambios químicos y cómo estas alteraciones afectaron el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los valores de cada propiedad se obtuvieron promediando los resultados de tres repeticiones para cada tipo de residuo orgánico y sustrato regional.

Se evaluaron las propiedades de pH y Conductividad eléctrica (CE) de los sustratos utilizando un potenciómetro y conductímetro portátil Hanna® Instruments en una relación de solución 1:2 en volumen (sustrato:agua destilada) (Torres *et al.*, 2013). Los sustratos se remojaron en agua destilada durante 30 minutos, luego se filtraron para obtener el extracto de saturación y registrar los valores de pH y CE.

La Materia orgánica (MO) y el carbono orgánico (CO) se determinaron mediante el método de calcinación (Secretaría de Economía, 2008). Se pesó 1.5 g de muestra y se colocó en un crisol de porcelana previamente seco y tarado. La mufla se calentó gradualmente hasta alcanzar una temperatura de 550°C. Una vez obtenida esta temperatura las muestras se mantuvieron en la estufa durante tres horas, luego se enfriaron los crisoles en un desecador y se volvieron a pesar. Se realizaron los cálculos para determinar el porcentaje de cenizas y MO. Para convertir la MO en CO, se aplicó el factor 1.724 propuesto por Van Bemmelen (1890), el cual asume que el 58% de la MO está formada por carbono. Las fórmulas se muestran a continuación.

$$\text{Cenizas (\%)} = \frac{\text{Peso del crisol con cenizas (g)} - \text{Peso del crisol (g)}}{\text{Peso de la muestra (g)}} * 100$$

$$\text{MO (\%)} = 100 - \% \text{Cenizas}$$

$$\text{CO (\%)} = \frac{\% \text{MO}}{1.724}$$

La concentración de nitrógeno (N) se determinó mediante el método semi micro-Kjendahl (Bremner, 1965), se utilizó ácido sulfúrico-salicílico para la digestión, con 0.15 g de muestra molida y tamizada con una malla de 2.0 mm de diámetro (malla 10). A partir de los porcentajes obtenidos de CO y N, se calculó la relación Carbono Nitrógeno (C/N). La concentración de minerales totales (K, Mg, Ca, Fe, Mn, Zn y Cu) se

**Tabla 1. Materiales utilizados en la formulación de siete sustratos y proporciones utilizadas en volumen.**

Sustratos	Componentes	Volumen
Testigo	Turba de musgo : fino de eucalipto	3 : 2
S1	Raquis de palma de aceite : turba de musgo : perlita : vermiculita	3 : 1 : 0.5 : 0.5
S2	Raquis de palma de aceite : aserrín de cedro : carbón de coquillo : cáscara de cacao	3 : 1 : 0.5 : 0.5
S3	Aserrín de cedro : turba de musgo : carbón de coquillo : cáscara de cacao	3 : 1 : 0.5 : 0.5
S4	Cáscara de cacao : aserrín de cedro : carbón de coquillo	3 : 1.5 : 0.5
S5	Fino de eucalipto : aserrín de cedro : cáscara de cacao	3 : 1 : 1
S6	Fibra de coco : aserrín de cedro : cáscara de cacao	3 : 1 : 1

llevó a cabo mediante digestión húmeda, utilizando una mezcla de ácido perclórico  $\text{HClO}_4$  y ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  en una relación 2:1 (Álvarez-Sánchez & Marín-Campos 2011). Los extractos de los sustratos pulverizados se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica (modelo: AANALYST 700, marca: Perkin Elmer; software: Syngistix for AA v. 3.0.3).

### Variables morfológicas de las plantas

Se midieron la altura de la parte aérea (A) y el diámetro del cuello del tallo (D) de las plantas cada 15 días, hasta alcanzar los 3 meses de edad. Para ello, se tomaron mediciones de 48 plantas por tratamiento, distribuidas en cuatro repeticiones de 12 plantas cada una. Al finalizar el experimento, los cepellones de las plantas fueron cuidadosamente desmoronados y las raíces se lavaron por separado con agua potable y después con agua desionizada, con el fin de eliminar restos de sustrato adherido. Posteriormente, las partes aéreas y las raíces fueron separadas y colocadas en bolsas de papel estraza para ser secadas en la estufa a  $70 \pm 5^\circ\text{C}$  durante 72 horas. Al finalizar el secado, se registraron el Peso Seco Aéreo (PSA) y el Peso Seco Radical (PSR). Con los datos obtenidos, se calcularon las siguientes variables: la relación entre peso seco aéreo y peso seco radical (PSA/PSR) y el Índice de Robustez (IR), definido como la razón entre la altura de la planta y el diámetro del cuello del tallo (A/D).

### Concentración nutrimental en el follaje de las plantas

El análisis de la concentración de nutrientes en el follaje se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencia Animal y en el Laboratorio Central en el Área de Instrumentación Analítica del Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. El follaje de cada una de las cuatro repeticiones (con 12 plantas por repetición) fue secado y pulverizado previo a los análisis. La determinación de nitrógeno (N) se realizó mediante el método semi micro-Kjeldahl (Bremner, 1965), usando ácido sulfúrico-salicílico para la digestión. Para la cuantificación de P, K, Mg y Ca se utilizó el extracto obtenido tras la digestión húmeda de material vegetal seco con ácido sulfúrico, ácido perclórico y peróxido de hidrógeno. Las mediciones de

los extractos y diluciones se realizaron mediante espectrofotometría de absorción atómica, empleando un espectrofotómetro modelo: AANALYST 700, marca: Perkin Elmer; software: Syngistix for AA v. 3.0.3.

La absorción de nutrientes en el brote se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Absorción de nutrientes en el brote (mg planta}^{-1}) = \text{concentración nutrimental (\%)} * \left( \frac{\text{PSA(g)}}{100\%} \right) * 1000$$

### Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial, el cual consideró factor sustrato (siete niveles) y factor fertilizante (tres niveles), 21 tratamientos con cuatro repeticiones para cada uno. La unidad experimental del ensayo consideró 12 tubetes forestales de  $160 \text{ cm}^3$ , con una plántula en cada uno.

Los resultados se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y se sometieron a la prueba de comparación múltiple de medias Tukey ( $p \leq 0.05$ ) utilizando el software estadístico InfoStat version 2020 (Di Rienzo *et al.*, 2020).

### Costos de producción

La evaluación de costos se llevó a cabo considerando los gastos de la preparación individual de los diferentes sustratos regionales. Además, se evaluaron los costos de los sustratos en combinación con los tres tipos de fertilizantes: fertilizante de liberación controlada (FLC), fertilizante hidrosoluble (HS) y biofertilizante con micorrizas (M) como complemento para la producción de plantas, considerando las cantidades aplicadas y el precio unitario de cada tipo de fertilizante y el costo de la mano de obra que incluyó la actividad de la preparación de los sustratos. Los costos totales se estimaron mediante la suma de estos tres componentes, expresados en moneda local. Los costos fueron calculados considerando un tipo de cambio de \$16.80 MXN por dólar, con base en los

valores registrados en abril de 2024 (Banco de México, 2024).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Propiedades químicas de los sustratos posterior al experimento de campo

Los resultados de las propiedades químicas de los sustratos evaluados al finalizar el experimento de producción de plantas se presentan en las tablas 2 y 3. Las propiedades analizadas incluyeron pH, CE, MO, CO y C/N (Tabla 2) y el contenido de minerales totales (Tabla 3).

En cuanto al pH final, la interacción entre tipo de sustrato y tipo de fertilizante tuvo un efecto significativo ( $p < 0.05$ ). Para los tratamientos con Fertilizante de Liberación Controlada (FLC), los valores de pH oscilaron entre 4.92 (Testigo\_FLC) y 6.32 (S2\_FLC), se encontraron valores consistentemente más bajos en comparación con los

tratamientos que emplearon Fertilizante Hidrosoluble (HS) o biofertilizante con micorrizas (M). En los tratamientos con HS, los valores de pH estuvieron en un intervalo de 6.10 (S4 HS) a 7.18 (S1 HS), presentan una tendencia hacia valores más alcalinos. El fertilizante HS, al liberar amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), reacciona rápidamente con el agua formando ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) y liberando iones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ). Esta reacción ácido-base incrementa la concentración de  $\text{OH}^-$  en la solución y, en consecuencia, incrementa temporalmente el pH de los sustratos. Este efecto también ha sido observado en cultivos establecidos en sustratos a base de turba, donde la liberación de amonio tras la fertilización orgánica provocó un aumento inicial del pH antes del inicio de la nitrificación (Frerichs *et al.*, 2020).

El análisis factorial mostró que la interacción entre tipo de sustrato y tipo de fertilizante tuvo un efecto significativo ( $p < 0.05$ ) sobre la CE final de los sustratos. La conductividad eléctrica de una solución está directamente relacionada con la concentración de

**Tabla 2. Propiedades químicas de los sustratos al finalizar el experimento.**

Tratamientos	pH	CE dS m <sup>-1</sup>	MO %	CO %	C/N
Testigo_FLC	4.92 <sup>i</sup>	0.44 <sup>a</sup>	76.10 <sup>ef</sup>	44.14 <sup>ef</sup>	18.92 <sup>bcd</sup>
S1_FLC	5.59 <sup>fg</sup>	0.42 <sup>ab</sup>	55.75 <sup>h</sup>	32.34 <sup>h</sup>	14.41 <sup>g</sup>
S2_FLC	6.32 <sup>cde</sup>	0.42 <sup>ab</sup>	85.22 <sup>abcd</sup>	49.43 <sup>abcd</sup>	20.20 <sup>abc</sup>
S3_FLC	5.77 <sup>f</sup>	0.20 <sup>def</sup>	86.49 <sup>ab</sup>	50.17 <sup>ab</sup>	21.44 <sup>a</sup>
S4_FLC	5.41 <sup>gh</sup>	0.45 <sup>a</sup>	74.91 <sup>fg</sup>	43.45 <sup>fg</sup>	18.08 <sup>de</sup>
S5_FLC	5.16 <sup>hi</sup>	0.47 <sup>a</sup>	80.25 <sup>bcd</sup>	46.55 <sup>bcd</sup>	20.03 <sup>abc</sup>
S6_FLC	5.42 <sup>gh</sup>	0.35 <sup>abc</sup>	76.60 <sup>ef</sup>	44.43 <sup>ef</sup>	19.24 <sup>bcd</sup>
Testigo_HS	6.49 <sup>cd</sup>	0.18 <sup>ef</sup>	78.11 <sup>ef</sup>	45.31 <sup>ef</sup>	18.98 <sup>bcd</sup>
S1_HS	7.18 <sup>a</sup>	0.17 <sup>ef</sup>	55.68 <sup>h</sup>	32.30 <sup>h</sup>	14.13 <sup>g</sup>
S2_HS	7.15 <sup>a</sup>	0.31 <sup>bcd</sup>	74.17 <sup>fg</sup>	43.02 <sup>fg</sup>	17.78 <sup>de</sup>
S3_HS	6.58 <sup>bc</sup>	0.11 <sup>f</sup>	87.53 <sup>a</sup>	50.77 <sup>a</sup>	21.57 <sup>a</sup>
S4_HS	6.10 <sup>e</sup>	0.17 <sup>ef</sup>	77.05 <sup>ef</sup>	44.69 <sup>ef</sup>	19.24 <sup>bcd</sup>
S5_HS	6.44 <sup>cd</sup>	0.17 <sup>ef</sup>	82.19 <sup>abcde</sup>	47.67 <sup>abcde</sup>	20.37 <sup>ab</sup>
S6_HS	6.23 <sup>de</sup>	0.11 <sup>f</sup>	79.56 <sup>cdef</sup>	46.15 <sup>cdef</sup>	19.98 <sup>abc</sup>
Testigo_M	6.51 <sup>cd</sup>	0.13 <sup>f</sup>	76.42 <sup>ef</sup>	44.33 <sup>ef</sup>	18.24 <sup>de</sup>
S1_M	7.27 <sup>a</sup>	0.36 <sup>abc</sup>	61.03 <sup>h</sup>	35.40 <sup>h</sup>	15.48 <sup>fg</sup>
S2_M	7.25 <sup>a</sup>	0.26 <sup>cde</sup>	78.92 <sup>def</sup>	45.78 <sup>def</sup>	18.61 <sup>cd</sup>
S3_M	6.82 <sup>b</sup>	0.13 <sup>f</sup>	85.89 <sup>abc</sup>	49.82 <sup>abc</sup>	20.31 <sup>abc</sup>
S4_M	5.81 <sup>f</sup>	0.18 <sup>ef</sup>	78.85 <sup>def</sup>	45.74 <sup>def</sup>	19.01 <sup>bcd</sup>
S5_M	6.25 <sup>de</sup>	0.17 <sup>ef</sup>	68.82 <sup>g</sup>	39.92 <sup>g</sup>	16.64 <sup>ef</sup>
S6_M	6.59 <sup>bc</sup>	0.13 <sup>f</sup>	86.56 <sup>ab</sup>	50.21 <sup>ab</sup>	21.13 <sup>a</sup>
DMS	0.28	0.11	6.62	3.84	1.72

Testigo: turba de musgo: fino de eucalipto (3:2); S1: raquis de palma de aceite: turba de musgo: perlita: vermiculita (3:1:0.5:0.5); S2: raquis de palma de aceite: aserrín de cedro: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S3: aserrín de cedro: turba de musgo: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S4: cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo (3:1.5:0.5); S5: fino de eucalipto: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); S6: fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); DMS: diferencia mínima significativa. Medias con letras comunes en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).

**Tabla 3. Concentración promedio de nutrientes totales en los sustratos evaluados al terminar el experimento.**

Tratamiento	N	P	K (%)	Mg	Ca
Testigo_FLC	2.33 <sup>figh</sup>	0.62 <sup>cde</sup>	0.40 <sup>a</sup>	1.59 <sup>bc</sup>	1.02 <sup>bdef</sup>
S1_FLC	2.24 <sup>i</sup>	1.61 <sup>a</sup>	0.19 <sup>defghi</sup>	2.09 <sup>a</sup>	0.94 <sup>bdef</sup>
S2_FLC	2.45 <sup>ab</sup>	0.59 <sup>cdef</sup>	0.34 <sup>abc</sup>	0.26 <sup>gh</sup>	1.25 <sup>bcd</sup>
S3_FLC	2.34 <sup>efgh</sup>	0.24 <sup>g</sup>	0.09 <sup>i</sup>	0.70 <sup>e</sup>	0.79 <sup>ef</sup>
S4_FLC	2.40 <sup>abcde</sup>	0.32 <sup>efg</sup>	0.13 <sup>ghi</sup>	0.32 <sup>gh</sup>	0.89 <sup>def</sup>
S5_FLC	2.32 <sup>figh</sup>	0.28 <sup>fg</sup>	0.10 <sup>hi</sup>	0.24 <sup>h</sup>	1.03 <sup>bdef</sup>
S6_FLC	2.31 <sup>gh</sup>	0.27 <sup>fg</sup>	0.12 <sup>ghi</sup>	0.27 <sup>gh</sup>	0.79 <sup>ef</sup>
Testigo_HS	2.39 <sup>bcd</sup>	0.31 <sup>efg</sup>	0.44 <sup>a</sup>	1.45 <sup>cd</sup>	0.07 <sup>g</sup>
S1_HS	2.29 <sup>hi</sup>	0.38 <sup>cdefg</sup>	0.14 <sup>efghi</sup>	1.84 <sup>ab</sup>	1.03 <sup>bcd</sup>
S2_HS	2.42 <sup>abc</sup>	0.59 <sup>cdef</sup>	0.25 <sup>cd</sup>	0.36 <sup>gh</sup>	1.31 <sup>ab</sup>
S3_HS	2.35 <sup>defg</sup>	0.17 <sup>g</sup>	0.12 <sup>hi</sup>	0.69 <sup>e</sup>	0.77 <sup>f</sup>
S4_HS	2.32 <sup>figh</sup>	0.22 <sup>g</sup>	0.14 <sup>efghi</sup>	0.38 <sup>figh</sup>	0.93 <sup>cdef</sup>
S5_HS	2.34 <sup>efgh</sup>	0.45 <sup>cdefg</sup>	0.18 <sup>defghi</sup>	0.52 <sup>efg</sup>	1.28 <sup>bcd</sup>
S6_HS	2.31 <sup>gh</sup>	0.65 <sup>cd</sup>	0.24 <sup>cdef</sup>	0.39 <sup>figh</sup>	0.90 <sup>def</sup>
Testigo_M	2.43 <sup>abc</sup>	0.66 <sup>cd</sup>	0.28 <sup>bcd</sup>	1.74 <sup>b</sup>	1.16 <sup>bcd</sup>
S1_M	2.29 <sup>hi</sup>	1.27 <sup>b</sup>	0.40 <sup>a</sup>	1.29 <sup>d</sup>	1.63 <sup>a</sup>
S2_M	2.46 <sup>a</sup>	0.66 <sup>c</sup>	0.25 <sup>cd</sup>	0.32 <sup>gh</sup>	1.17 <sup>bcd</sup>
S3_M	2.45 <sup>a</sup>	0.34 <sup>defg</sup>	0.23 <sup>defg</sup>	0.64 <sup>ef</sup>	0.75 <sup>f</sup>
S4_M	2.41 <sup>abcd</sup>	0.69 <sup>c</sup>	0.20 <sup>defgh</sup>	0.47 <sup>efgh</sup>	0.96 <sup>bcd</sup>
S5_M	2.40 <sup>abcde</sup>	0.69 <sup>c</sup>	0.25 <sup>cde</sup>	0.30 <sup>gh</sup>	1.07 <sup>bcd</sup>
S6_M	2.38 <sup>cdef</sup>	0.42 <sup>cdefg</sup>	0.38 <sup>ab</sup>	0.34 <sup>gh</sup>	0.77 <sup>f</sup>
DMS	0.06	0.32	0.10	0.26	0.37

Testigo: turba de musgo: fino de eucalipto (3:2); S1: raquis de palma de aceite: turba de musgo: perlita: vermiculita (3:1:0.5:0.5); S2: raquis de palma de aceite: aserrín de cedro: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S3: aserrín de cedro: turba de musgo: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S4: cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo (3:1.5:0.5); S5: fino de eucalipto: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); S6: fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); DMS: diferencia mínima significativa. Medias con letras comunes en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).

iones presentes, ya que los fertilizantes se absorben en forma de iones con carga eléctrica (Landis *et al.*, 2014). Por lo tanto, las diferencias en CE entre tratamientos reflejan la variabilidad en la disponibilidad iónica resultante del tipo de fertilizante aplicado. En los tratamientos con FLC, los valores oscilaron entre 0.20 dS m<sup>-1</sup> (S3\_FLC) y 0.47 dS m<sup>-1</sup> (S5\_FLC), con un promedio general más alto en comparación con los tratamientos que utilizaron HS o M. En los tratamientos con HS, los valores de CE fueron más bajos, con un intervalo de 0.11 dS m<sup>-1</sup> (S3\_HS y S6\_HS) a 0.31 dS m<sup>-1</sup> (S2\_HS). El Testigo\_HS tuvo una CE de 0.18 dS m<sup>-1</sup>, muestra una tendencia hacia niveles de salinidad menores en comparación con los tratamientos de FLC. Por otro lado, los tratamientos con M presentaron los valores de CE más bajos en general, con un intervalo de 0.13 dS m<sup>-1</sup> (Testigo\_M, S3\_M y S6\_M) a 0.36 dS m<sup>-1</sup> (S1\_M). El Testigo\_M mostró el menor valor entre los tres tipos de fertilizantes (0.13 dS m<sup>-1</sup>). Este comportamiento podría explicarse por el efecto del biofertilizante con micorrizas en la estabilización de las sales en el sustrato. En general, los resultados mostraron que los fertilizantes HS y M contribuyeron a mantener niveles

de CE más bajos en los sustratos en comparación con FLC.

Los resultados obtenidos para la materia orgánica (MO) mostraron un comportamiento similar al del contenido de carbono orgánico (CO), con una correlación directa entre ambas variables, como es de esperarse dado que el CO es un componente principal de la MO. El análisis estadístico mostró que el tipo de fertilizante no tuvo un efecto significativo sobre el CO ( $p > 0.05$ ). Sin embargo, el tipo de sustrato y la interacción entre sustrato y fertilizante sí tuvieron efectos significativos ( $p < 0.05$ ). Just *et al.* (2024). observaron que los efectos positivos sobre el carbono del suelo se potenciaban cuando la fertilización (especialmente la mineral) se combinaba con factores que estimulan el crecimiento radicular y la acumulación de residuos de cultivos.

En los tratamientos con FLC, los valores de CO variaron de 32.34% (S1\_FLC) a 50.17% (S3\_FLC). El Testigo\_FLC presentó un valor de 44.14%, mientras que los sustratos S2\_FLC, S3\_FLC, S5\_FLC y S6\_FLC mostraron valores superiores, destacándose S3\_FLC como el más alto dentro de este grupo. En los

tratamientos con HS, los valores de CO oscilaron entre 32.30% (S1\_HS) y 50.77% (S3\_HS). El Testigo\_HS tuvo un valor de 45.31%. Sustratos como S5\_HS (47.67%) y S6\_HS (46.15%) también presentaron valores elevados, mientras que el S1\_HS mostró el menor contenido de CO dentro de este grupo. Por su parte, los tratamientos con biofertilizante con micorrizas M registraron valores de CO entre 35.40% (S1\_M) y 50.21% (S6\_M). El Testigo\_M presentó un valor de 44.33%. Los sustratos S3\_M (49.82%) y S6\_M (50.21%) alcanzaron los valores más altos en este grupo, mientras que S1\_M y S5\_M mostraron contenidos de CO más bajos.

El análisis de la interacción entre sustrato y fertilizante indica que la variación en el contenido de CO depende principalmente del tipo de sustrato utilizado. Sustratos como S3 y S6, independientemente del fertilizante aplicado, presentaron valores consistentemente altos de CO, mientras que el S1 mostró valores más bajos en todos los tratamientos.

Los resultados de la relación Carbono/Nitrógeno (C/N) en los tratamientos con FLC oscilaron entre 14.41 (S1\_FLC) y 21.44 (S3\_FLC). El Testigo\_FLC presentó un valor de 18.92, fue superado por los sustratos S2\_FLC, S3\_FLC, S5\_FLC y S6\_FLC, que presentaron relaciones C/N más altas. En los tratamientos con HS, la relación C/N varió de 14.13 (S1\_HS) a 21.57 (S3\_HS). El Testigo\_HS alcanzó un valor de 18.98. destacaron los sustratos S5\_HS (20.37) y S6\_HS (19.98) con valores elevados, mientras que S1\_HS presentó la relación más baja, lo que pudo reflejar una mayor actividad microbiana y mineralización del nitrógeno, lo que redujo la proporción de carbono respecto al nitrógeno (Tabla 2). Por su parte, los tratamientos con biofertilizante (M), mostraron valores de la relación C/N entre 15.48 (S1\_M) y 21.13 (S6\_M). El Testigo\_M presentó un valor intermedio de 18.24, mientras que los sustratos S3\_M (20.31) y S6\_M (21.13) registraron las relaciones más altas dentro de este grupo. En los tres tipos de fertilizantes evaluados, el sustrato S1 presentó la relación C:N más baja, mientras que el sustrato S3 mostró los valores más altos. Este comportamiento sugiere un patrón estructural en la composición de los sustratos, independiente del tipo de fertilizante aplicado. Según Landis *et al.* (2014), cuando la relación C:N supera el valor de 15, el nitrógeno disponible tiende a inmovilizarse debido a la actividad microbiana; en cambio, cuando la relación es menor a 15, el nitrógeno se mineraliza y queda disponible para la absorción por parte de las plantas. En este estudio, se observó que el sustrato S3, independientemente del fertilizante utilizado, estuvo asociado con las menores alturas de planta (Tabla 4). Considerando que el nitrógeno es esencial para la síntesis de proteínas, clorofila y componentes estructurales de la célula vegetal (Foth, 1992), su disponibilidad limitada puede

afectar negativamente el crecimiento en altura. Por tanto, es probable que la elevada relación C:N del sustrato S3 haya contribuido a una menor disponibilidad de nitrógeno, repercutiendo directamente en el desarrollo morfológico de las plantas.

Los valores de nitrógeno total mostraron diferencias significativas entre los 21 tratamientos, con un intervalo que osciló entre el 2.24% y el 2.46% (Tabla 3). Aunque la variación no fue considerable en términos absolutos, los resultados fueron diferentes estadísticamente. En los tratamientos con fertilizante de liberación controlada (FLC), los valores de fósforo oscilaron entre 0.24% (S3\_FLC) y 1.61% (S1\_FLC). El Testigo\_FLC presentó un valor de 0.62%, fue superado únicamente por S1\_FLC, que mostró el nivel más alto de fósforo en este grupo. Los demás sustratos con FLC presentaron valores relativamente bajos, especialmente S3\_FLC, S4\_FLC, S5\_FLC y S6\_FLC, con niveles menores a 0.35%. En los tratamientos con fertilizante hidrosoluble (HS), los valores de fósforo variaron entre 0.17% (S3\_HS) y 0.65% (S6\_HS). El Testigo\_HS tuvo un valor de 0.31%, mientras que los sustratos S1\_HS (0.38%), S2\_HS (0.59%) y S6\_HS (0.65%) mostraron niveles más altos. El sustrato S3\_HS presentó el contenido más bajo de fósforo en este grupo, lo que podría estar relacionado con una mayor absorción por las plantas o pérdida por lixiviación. Por su parte, los tratamientos con biofertilizante de micorrizas (M) mostraron valores de fósforo entre 0.34% (S3\_M) y 1.27% (S1\_M). El Testigo\_M presentó un valor de 0.66%, con niveles destacados en S1\_M (1.27%) y S4\_M/S5\_M (0.69% cada uno). Los resultados sugieren que las micorrizas del biofertilizante podrían haber favorecido una mayor disponibilidad de fósforo en algunos sustratos, especialmente en S1\_M, que alcanzó el nivel más alto entre todos los tratamientos evaluados. En general, el sustrato S1 mostró consistentemente los valores más altos de fósforo en los tres tipos de fertilizantes, mientras que el sustrato S3 presentó los valores más bajos para cada tipo de fertilizante.

En los tratamientos con fertilizante de liberación controlada (FLC), los valores de potasio variaron entre 0.09% (S3\_FLC) y 0.40% (Testigo\_FLC). El Testigo\_FLC presentó el nivel más alto de potasio en este grupo, mientras que los sustratos restantes mostraron valores significativamente menores, particularmente S3\_FLC, S5\_FLC y S6\_FLC, cuyos niveles de potasio estuvieron por debajo de 0.15%. Estos resultados sugieren que una parte del potasio total podría haber estado en formas menos accesibles o inmovilizadas, lo que limitaría su disponibilidad para las plantas. En los tratamientos con fertilizante hidrosoluble (HS), los valores oscilaron entre 0.12% (S3\_HS) y 0.44% (Testigo\_HS). Los sustratos S2\_HS (0.25%) y S6\_HS (0.24%) mostraron valores

relativamente altos dentro de este grupo, mientras que S3\_HS y S1\_HS presentaron los valores más bajos. El Testigo\_HS mostró el nivel más alto de potasio entre todos los tratamientos con HS. En los tratamientos con biofertilizante de micorrizas (M), los valores de potasio fluctuaron entre 0.20% (S4\_M) y 0.40% (S1\_M). El Testigo\_M presentó un valor de 0.28%, mientras que S1\_M y S6\_M alcanzaron los niveles más altos dentro de este grupo. En general, los tratamientos testigo para cada fertilizante presentaron los niveles más altos de potasio, excepto en el caso del biofertilizante, donde S1\_M destacó. Entre los sustratos, S3 fue consistente en presentar los niveles más bajos de potasio en todos los tratamientos. Este comportamiento podría estar relacionado con la capacidad de retención del potasio en los sustratos o con diferencias en la absorción por las plantas.

En los tratamientos con fertilizante de liberación controlada (FLC), los valores de magnesio oscilaron entre 0.24% (S5\_FLC) y 2.09% (S1\_FLC). El Testigo\_FLC presentó un valor de 1.59%, y fue superado únicamente por S1\_FLC, que mostró la concentración más alta de magnesio entre todos los tratamientos con este tipo de fertilizante. Por otro lado, los sustratos S2\_FLC, S5\_FLC y S6\_FLC presentaron las concentraciones más bajas, con valores por debajo de 0.30%. En los tratamientos con fertilizante hidrosoluble (HS), las concentraciones variaron entre 0.36% (S2\_HS) y 1.84% (S1\_HS). El Testigo\_HS mostró un contenido de 1.45%, y fue superado por S1\_HS, que destacó por su alto contenido de magnesio (1.84%). Sin embargo, los sustratos S2\_HS, S3\_HS y S6\_HS presentaron niveles menores de magnesio. En los tratamientos con biofertilizante (M), los valores oscilaron entre 0.30% (S5\_M) y 1.74% (Testigo\_M). El Testigo\_M mostró el mayor contenido de magnesio dentro de este grupo, seguido por S1\_M (1.29%). En contraste, los sustratos S5\_M y S2\_M presentaron los valores más bajos, con concentraciones menores a 0.35%.

En general, los tratamientos con fertilizantes hidrosolubles y de liberación controlada mostraron valores más altos de magnesio en los sustratos testigo y en S1, mientras que los sustratos restantes presentaron una marcada reducción en el contenido de este nutriente. Este comportamiento sugiere que los sustratos con concentraciones bajas de magnesio podrían haber favorecido una mayor extracción del nutriente por parte de las plantas. Esto se puede constatar con el contenido nutrimental del follaje (Tabla 5), de los sustratos testigo y S1 con el fertilizante hidrosoluble principalmente donde se obtuvieron porcentajes altos de Mg.

El contenido de calcio (% Ca) en los diferentes tratamientos mostró variaciones significativas. En los sustratos con fertilizante de liberación controlada (FLC), los valores oscilaron entre 0.79% (S3\_FLC y S6\_FLC) y 1.25% (S2\_FLC). El Testigo\_FLC presentó un contenido intermedio (1.02%). Estos resultados indican que el sustrato S2\_FLC retuvo la mayor cantidad de calcio, mientras que S3\_FLC y S6\_FLC fueron los sustratos con menor contenido de este nutriente. En los tratamientos con fertilización hidrosoluble (HS), el contenido de calcio varió desde 0.07% (Testigo\_HS) hasta 1.31% (S2\_HS). El Testigo\_HS presentó el valor más bajo registrado en todos los tratamientos, indicando una mínima retención de calcio. Por otro lado, los sustratos S3\_HS y S6\_HS presentaron contenidos relativamente bajos (0.77% y 0.90%, respectivamente), mientras que S2\_HS mostró la mayor retención de calcio en este grupo. Finalmente, en los tratamientos con biofertilizante (M), el contenido de calcio varió entre 0.77% (S6\_M) y 1.63% (S1\_M). El S6\_M presentó el menor contenido de calcio en este grupo, mientras que S1\_M destacó por su capacidad de retención significativamente superior.

### **Variables morfológicas de las plantas de palma de aceite**

Los efectos de los diferentes tipos de tratamientos de sustratos y fertilizantes en las variables morfológicas de las plantas de palma de aceite se muestran en el Tabla 4, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados.

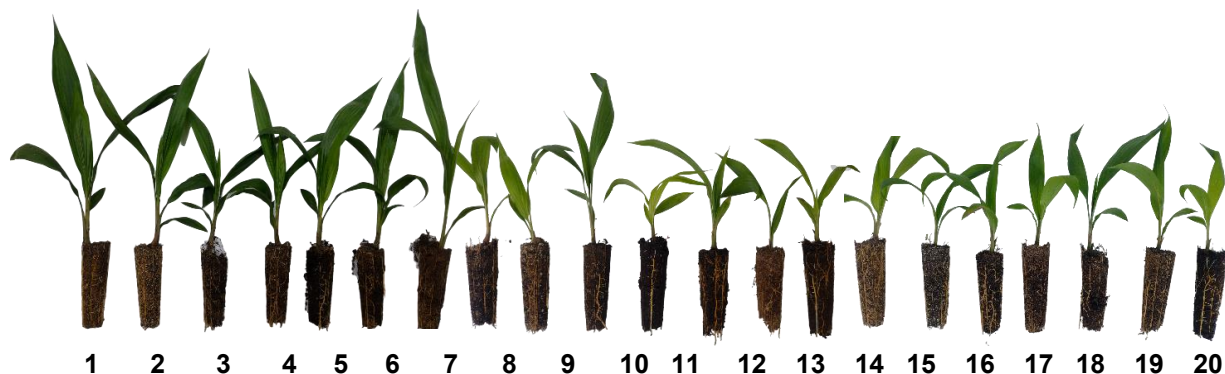
Al final de la etapa de previvero (Figura 1), una plántula normal tiene de tres a cuatro hojas lanceoladas, cada hoja emitida es más larga que el anterior cuando está completamente desarrollada. La altura de la plántula con las hojas totalmente extendidas es de 20-25 cm y el diámetro del cuello del tallo es de 4 mm (PalmElit, 2008). En cuanto a la altura de las plantas (A), se presentaron resultados favorables con los tratamientos S6\_FLC, T\_FLC y S4\_FLC que desarrollaron mayor altura entre todos los tratamientos (30.86, 30.29 y 29.92 cm, respectivamente) y para la variable de diámetro nuevamente los tratamientos T\_FLC y S4\_FLC presentaron los valores más altos (6.07 y 6.04 mm respectivamente) superando los registros. Se observa que estos tres sustratos con el fertilizante de liberación controlada tuvieron mejor crecimiento (Tabla 4) y desarrollo nutrimental (Tabla 5). La duración efectiva del fertilizante de liberación controlada es mucho mayor que la de los fertilizantes convencionales (Priya *et al.*, 2024).



**Tabla 4. Valores promedio de las variables morfológicas de plántulas de *Elaeis guineensis* Jacq. de tres meses de edad, producidas con sustratos regionales y fertilizantes.**

Tratamiento	A (cm)	D (mm)	PSA (g)	PSR (g)	PSA/ PSR	IR
Testigo_FLC	30.29 <sup>ab</sup>	6.07 <sup>a</sup>	1.27 <sup>a</sup>	0.29 <sup>c</sup>	4.46 <sup>a</sup>	4.99 <sup>ab</sup>
S1_FLC	27.63 <sup>bc</sup>	5.99 <sup>ab</sup>	1.03 <sup>b</sup>	0.47 <sup>a</sup>	2.23 <sup>abcd</sup>	4.62 <sup>abede</sup>
S2_FLC	27.13 <sup>c</sup>	5.73 <sup>abcd</sup>	0.97 <sup>b</sup>	0.43 <sup>abc</sup>	2.28 <sup>bcd</sup>	4.74 <sup>abc</sup>
S3_FLC	24.13 <sup>de</sup>	5.38 <sup>abcdef</sup>	0.73 <sup>cd</sup>	0.41 <sup>abcd</sup>	1.78 <sup>def</sup>	4.48 <sup>bcdef</sup>
S4_FLC	29.92 <sup>ab</sup>	6.04 <sup>ab</sup>	0.98 <sup>b</sup>	0.42 <sup>abcd</sup>	2.37 <sup>bc</sup>	4.97 <sup>ab</sup>
S5_FLC	28.29 <sup>abc</sup>	5.44 <sup>abcdef</sup>	0.91 <sup>bc</sup>	0.35 <sup>bcd</sup>	2.64 <sup>b</sup>	5.21 <sup>a</sup>
S6_FLC	30.86 <sup>a</sup>	5.85 <sup>abc</sup>	1.00 <sup>b</sup>	0.40 <sup>abcd</sup>	2.47 <sup>bc</sup>	5.28 <sup>a</sup>
Testigo_HS	21.00 <sup>fg</sup>	5.85 <sup>abc</sup>	0.53 <sup>efg</sup>	0.42 <sup>abcd</sup>	1.28 <sup>fghi</sup>	3.73 <sup>ghi</sup>
S1_HS	19.00 <sup>ghi</sup>	4.30 <sup>g</sup>	0.41 <sup>g</sup>	0.38 <sup>abcde</sup>	1.08 <sup>i</sup>	4.42 <sup>bcdefg</sup>
S2_HS	26.53 <sup>cd</sup>	5.66 <sup>abcde</sup>	0.75 <sup>cd</sup>	0.34 <sup>bcd</sup>	2.28 <sup>bcd</sup>	4.69 <sup>abcd</sup>
S3_HS	17.64 <sup>hi</sup>	4.66 <sup>efg</sup>	0.38 <sup>g</sup>	0.34 <sup>bcd</sup>	1.11 <sup>hi</sup>	3.79 <sup>fghi</sup>
S4_HS	20.94 <sup>fg</sup>	4.93 <sup>cdefg</sup>	0.51 <sup>efg</sup>	0.35 <sup>abcde</sup>	1.45 <sup>fghi</sup>	4.25 <sup>cdefgh</sup>
S5_HS	19.14 <sup>ghi</sup>	4.77 <sup>defg</sup>	0.46 <sup>g</sup>	0.34 <sup>bcd</sup>	1.36 <sup>fghi</sup>	4.01 <sup>defghi</sup>
S6_HS	20.31 <sup>fgh</sup>	4.92 <sup>cdefg</sup>	0.48 <sup>fg</sup>	0.38 <sup>abcde</sup>	1.25 <sup>ghi</sup>	4.13 <sup>cdefghi</sup>
Testigo_M	18.41 <sup>ghi</sup>	5.16 <sup>abcdefg</sup>	0.50 <sup>efg</sup>	0.42 <sup>abcd</sup>	1.19 <sup>ghi</sup>	3.57 <sup>hi</sup>
S1_M	20.76 <sup>fg</sup>	5.59 <sup>abcdef</sup>	0.66 <sup>def</sup>	0.40 <sup>abcd</sup>	1.63 <sup>efgh</sup>	3.71 <sup>hi</sup>
S2_M	18.62 <sup>ghi</sup>	4.87 <sup>cdefg</sup>	0.51 <sup>efg</sup>	0.31 <sup>de</sup>	1.65 <sup>efg</sup>	3.83 <sup>fghi</sup>
S3_M	17.11 <sup>i</sup>	4.88 <sup>cdefg</sup>	0.43 <sup>g</sup>	0.32 <sup>cde</sup>	1.34 <sup>fghi</sup>	3.51 <sup>i</sup>
S4_M	22.53 <sup>ef</sup>	5.43 <sup>abcdef</sup>	0.67 <sup>de</sup>	0.32 <sup>cde</sup>	2.07 <sup>cde</sup>	4.15 <sup>cdefghi</sup>
S5_M	19.88 <sup>fgh</sup>	5.03 <sup>bcdefg</sup>	0.53 <sup>efg</sup>	0.45 <sup>ab</sup>	1.18 <sup>ghi</sup>	3.95 <sup>efghi</sup>
S6_M	18.50 <sup>ghi</sup>	4.63 <sup>fg</sup>	0.47 <sup>g</sup>	0.37 <sup>abcde</sup>	1.27 <sup>fghi</sup>	4.00 <sup>defghi</sup>
DMS	2.75	1.01	0.17	0.11	0.51	0.70

A: altura; D: diámetro; PSA: peso seco aéreo; PSR: peso seco radical; IR: índice de robustez. FLC: fertilización de liberación controlada; HS: fertilización hidrosoluble; M: biofertilizante con micorrizas. Testigo: turba de musgo: fino de eucalipto (3:2); S1: raquis de palma de aceite: turba de musgo: perlita: vermiculita (3:1:0.5:0.5); S2: raquis de palma de aceite: aserrín de cedro: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S3: aserrín de cedro: turba de musgo: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S4: cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo (3:1.5:0.5); S5: fino de eucalipto: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); S6: fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); DMS: diferencia mínima significativa. Medias con letras comunes en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).



**Figura 1. Crecimiento de plántulas de palma de aceite en la semana 11 en la etapa de previvero. 1: Testigo\_FLC; 2: S1\_FLC; 3: S2\_FLC; 4: S3\_FLC 5: S4\_FLC 6: S5\_FLC 7: S6\_FLC 8: Testigo\_HS 9: S1\_HS 10: S2\_HS 11: S3\_HS 12: S4\_HS 13: S5\_HS 14: S6\_HS 15: Testigo\_M 16: S1\_M 17: S2\_M 18: S3\_M 19: S4\_M 20: S5\_M 21: S6\_M; FLC: fertilización de liberación controlada; HS: fertilización hidrosoluble; M: biofertilización con micorrizas; Testigo: turba de musgo: fino de eucalipto (3:2); S1: raquis de palma de aceite: turba de musgo: perlita: vermiculita (3:1:0.5:0.5); S2: raquis de palma de aceite: aserrín de cedro: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S3: aserrín de cedro: turba de musgo: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S4: cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo (3:1.5:0.5); S5: fino de eucalipto: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); S6: fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1).**

La altura de las plantas presentó una correlación (Figura 2) significativa fuerte con el peso seco aéreo (PSA) ( $r = 0.94$ ), lo que indica que ambas variables están directamente relacionadas al provenir de la misma sección de la planta. Los tratamientos testigo\_FLC y el S6\_FLC destacaron al presentar los mayores valores de PSA con 1.27 y 1.00 g respectivamente. En contraste, el desarrollo del sistema radical fue más notable en el tratamiento S1\_FLC, que registró el mayor peso seco radical (PSR) con 0.47 g. Todos los tratamientos generaron mayor desarrollo de raíces en las plantas que el causado por el tratamiento Testigo\_FLC que presentó un peso de raíces de 0.29 g.

La relación PSA/PSR demostró que existe un efecto de mayor desarrollo de órganos fotosintéticos en el tratamiento Testigo\_FLC al poseer la relación más alta de 4.46, al contrario, el tratamiento S1\_HS presentó la relación más baja de 1.08 (Tabla 4). En cuanto al índice de robustez, los tratamientos S5\_FLC y S6\_FLC fueron estadísticamente similares y produjeron las plantas con mayor índice de robustez (5.21 y 5.28, respectivamente), superando al tratamiento Testigo\_FLC, que este a su vez fue similar estadísticamente con el tratamiento S4\_FLC, mientras que el tratamiento S3\_M presentó el menor índice (3.51).

### Concentración nutrimental en el follaje las plantas

El tratamiento T\_FLC presentó la mayor concentración de macronutrientes en comparación con todos los demás tratamientos (Tabla 5). En cuanto al nitrógeno (N), se observaron diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ). El tratamiento Testigo\_FLC registró el valor más alto (29.93 mg planta<sup>-1</sup>), superando a los demás tratamientos. Este resultado es consistente con lo reportado por Rosenani *et al.* (2016), quienes encontraron valores entre 29.66 y 32.48 mg planta<sup>-1</sup> en los mejores tratamientos de su estudio, elaborados a partir de sustrato de compost de desechos de palma de aceite. Sin embargo, los mejores resultados obtenidos para fósforo (P) (T\_FLC 5.21%) son bajos en comparación con los reportados por ellos (25.72-27.76 mg planta<sup>-1</sup>). En cuanto al potasio (K), no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos T\_FLC (22.14 mg planta<sup>-1</sup>), S4\_FLC (22.05 mg planta<sup>-1</sup>), S6\_FLC (22.50 mg planta<sup>-1</sup>) y S4\_M (20.88 mg planta<sup>-1</sup>). Estos valores también coinciden con el intervalo reportado por Rosenani *et al.* (2016) (19.70-24.01 mg planta<sup>-1</sup>). En el caso del magnesio (Mg) la concentración que reportan los

tratamientos S1\_FLC (4.81 mg planta<sup>-1</sup>) y S4\_FLC (4.70 mg planta<sup>-1</sup>) son cercanos al tratamiento Testigo\_FLC (5.21 mg planta<sup>-1</sup>) y estos a su vez son cercanos a los que reporta Rosenani *et al.* (2016) (6.44-6.53 mg planta<sup>-1</sup>). Así mismo, en el calcio (Ca) el tratamiento S4\_FLC (5.62 mg planta<sup>-1</sup>) fue el que más se acercó a los valores más altos (Testigo\_FLC – 6.54 mg planta<sup>-1</sup>).

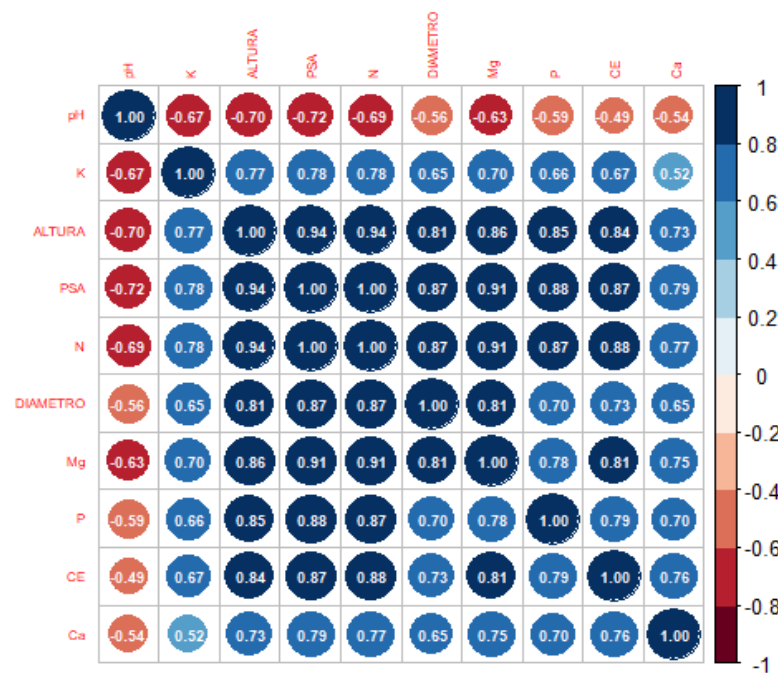
El análisis de correlación (Figura 2) reveló una asociación positiva significativa entre la concentración de nutrientes del sustrato y las variables morfológicas de las plántulas, lo que sugiere que la disponibilidad nutrimental favorece el desarrollo vegetal. Por otro lado, se identificó una correlación negativa entre el pH y dichas variables, lo que indica que un incremento en el pH puede limitar la disponibilidad de ciertos nutrientes y, en consecuencia, afectar el crecimiento de las plántulas. En concordancia con estos resultados, Yan *et al.* (2020) observaron que el uso de biochar en sustratos para producir diferentes especies de menta promovió una correlación positiva significativa entre la concentración de nutrientes en los brotes y el desarrollo morfológico de las plantas, mientras que el pH presentó una correlación negativa con el contenido nutrimental, la altura y diámetro de los individuos. En consecuencia, el pH desempeña un papel clave en la dinámica de absorción de nutrientes y en la respuesta morfológica de las plántulas (Huang *et al.*, 2025).

### Costos de producción de los sustratos regionales y fertilizantes

En este trabajo se muestran los costos totales incluyendo el de los sustratos, fertilizantes y mano de obra (Tabla 6).

El costo de la aplicación del biofungicida (Bactiva) fue de \$0.29 MXN (\$0.0172 USD) por litro de sustrato. Entre los fertilizantes utilizados, el hidrosoluble (PolyFeed) presentó el mayor costo, ya que alcanzó \$0.78 MXN (\$0.0464 USD) por litro de sustrato, debido a que se aplicó tres veces durante la etapa de previvero. Por su parte, el fertilizante de liberación controlada (Multicote) tuvo un costo de \$0.38 MXN (\$0.226 USD) por litro de sustrato, mientras que el biofertilizante con micorrizas (Fosfonat) presentó el costo más bajo, con \$0.15 MXN (\$0.0089 USD) por litro de sustrato.

Se consideraron 6 jornales (\$1686.00 MN) para la preparación de los sustratos que se utilizaron en el experimento.



**Figura 2.** Matriz de correlación entre variables de crecimiento y pH de los sustratos y nutrientes del brote de las plántulas. Los valores dentro de los círculos representan los coeficientes de correlación de Pearson (r). La intensidad del color indica la fuerza de la correlación, donde azul representa correlaciones positivas y rojo, correlaciones negativas.

**Tabla 5.** Concentración promedio de nutrientes en el follaje de *Elaeis guineensis* Jacq. de tres meses de edad.

Tratamiento	N	P	K	Mg	Ca
	(mg planta <sup>-1</sup> )				
Testigo_FLC	29.93 <sup>a</sup>	5.21 <sup>a</sup>	22.14 <sup>a</sup>	5.21 <sup>a</sup>	6.56 <sup>a</sup>
S1_FLC	26.64 <sup>b</sup>	3.91 <sup>bbc</sup>	15.97 <sup>cd</sup>	4.81 <sup>ab</sup>	4.70 <sup>bcd</sup>
S2_FLC	24.67 <sup>d</sup>	4.69 <sup>ab</sup>	15.97 <sup>gh</sup>	4.59 <sup>abc</sup>	5.37 <sup>abc</sup>
S3_FLC	18.10 <sup>h</sup>	2.53 <sup>def</sup>	15.70 <sup>cd</sup>	2.48 <sup>fgh</sup>	4.02 <sup>bcd</sup>
S4_FLC	24.14 <sup>c</sup>	3.30 <sup>cd</sup>	22.05 <sup>a</sup>	4.70 <sup>ab</sup>	5.62 <sup>ab</sup>
S5_FLC	22.30 <sup>f</sup>	3.34 <sup>cd</sup>	20.48 <sup>ab</sup>	3.58 <sup>cde</sup>	5.34 <sup>abcd</sup>
S6_FLC	25.20 <sup>c</sup>	3.07 <sup>cde</sup>	22.50 <sup>a</sup>	4.37 <sup>abc</sup>	4.83 <sup>abcde</sup>
Testigo_HS	13.04 <sup>jk</sup>	1.38 <sup>gh</sup>	10.12 <sup>gh</sup>	2.65 <sup>efg</sup>	3.99 <sup>bcd</sup>
S1_HS	10.46 <sup>o</sup>	0.45 <sup>i</sup>	8.66 <sup>h</sup>	2.30 <sup>fgh</sup>	2.87 <sup>fg</sup>
S2_HS	18.63 <sup>g</sup>	3.63 <sup>c</sup>	15.20 <sup>cde</sup>	3.08 <sup>def</sup>	3.75 <sup>cdefg</sup>
S3_HS	9.32 <sup>p</sup>	0.43 <sup>i</sup>	8.51 <sup>h</sup>	2.18 <sup>fgh</sup>	3.61 <sup>defg</sup>
S4_HS	12.61 <sup>kl</sup>	2.65 <sup>de</sup>	14.69 <sup>cdef</sup>	2.57 <sup>efgh</sup>	2.77 <sup>fg</sup>
S5_HS	11.19 <sup>n</sup>	1.33 <sup>gh</sup>	11.25 <sup>efgh</sup>	2.28 <sup>fgh</sup>	4.16 <sup>bcd</sup>
S6_HS	12.34 <sup>lm</sup>	0.94 <sup>ghi</sup>	12.40 <sup>defgh</sup>	1.54 <sup>h</sup>	2.24 <sup>g</sup>
Testigo_M	12.08 <sup>m</sup>	0.57 <sup>hi</sup>	9.90 <sup>gh</sup>	2.42 <sup>fgh</sup>	3.13 <sup>efg</sup>
S1_M	17.58 <sup>i</sup>	0.66 <sup>hi</sup>	15.31 <sup>cd</sup>	3.19 <sup>def</sup>	3.96 <sup>bcd</sup>
S2_M	13.19 <sup>j</sup>	2.36 <sup>ef</sup>	15.25 <sup>cd</sup>	2.35 <sup>fgh</sup>	3.74 <sup>cdefg</sup>
S3_M	10.91 <sup>no</sup>	0.42 <sup>i</sup>	11.22 <sup>fgh</sup>	1.96 <sup>gh</sup>	3.57 <sup>efg</sup>
S4_M	17.26 <sup>i</sup>	1.70 <sup>fg</sup>	20.88 <sup>a</sup>	3.80 <sup>bcd</sup>	2.77 <sup>fg</sup>
S5_M	13.34 <sup>j</sup>	1.10 <sup>ghi</sup>	13.02 <sup>cdefg</sup>	2.53 <sup>efgh</sup>	2.84 <sup>fg</sup>
S6_M	12.22 <sup>lm</sup>	0.58 <sup>hi</sup>	16.69 <sup>bc</sup>	1.77 <sup>gh</sup>	2.80 <sup>fg</sup>
DMS	0.45	0.86	3.95	1.05	1.73

Testigo: turba de musgo: fino de eucalipto (3:2); S1: raquis de palma de aceite: turba de musgo: perlita: vermiculita (3:1:0.5:0.5); S2: raquis de palma de aceite: aserrín de cedro: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S3: aserrín de cedro: turba de musgo: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S4: cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo (3:1.5:0.5); S5: fino de eucalipto: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); S6: fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); DMS: diferencia mínima significativa. Medias con letras comunes en la misma columna no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ ).

**Tabla 6. Costos de los sustratos regionales y sustratos regionales fertilizados (en pesos L<sup>-1</sup>) utilizados en el experimento en Huimanguillo, Tabasco.**

	SUSTRATOS						
	Testigo	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Sin fertilizante	\$7.86	\$ 6.16	\$ 1.44	\$ 4.94	\$ 5.56	\$ 2.48	\$ 6.71
Con fertilizante FLC	\$13.80	\$ 12.10	\$ 7.38	\$ 10.88	\$ 11.50	\$ 8.42	\$ 12.65
Con fertilizante HS	\$14.20	\$ 12.50	\$ 7.78	\$ 11.28	\$ 11.90	\$ 8.82	\$ 13.05
Con biofertilizante M	\$13.57	\$ 11.87	\$ 7.15	\$ 10.65	\$ 11.27	\$ 8.19	\$ 12.42

FLC: Fertilizante de liberación controlada; HS: Hidrosoluble; M: biofertilizante con micorrizas; Testigo: turba de musgo; fino de eucalipto (3:2); S1: raquis de palma de aceite: turba de musgo: perlita: vermiculita (3:1:0.5:0.5); S2: raquis de palma de aceite: aserrín de cedro: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S3: aserrín de cedro: turba de musgo: carbón de coquillo: cáscara de cacao (3:1:0.5:0.5); S4: cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo (3:1.5:0.5); S5: fino de eucalipto: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1); S6: fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1).

Para efectos de la evaluación de costos de sustratos y fertilizantes se consideró solo los 6 jornales que incluyeron la preparación de los sustratos, sin embargo, para conocer el costo de la producción de planta (3 meses de edad) es necesario contemplar el gasto que generan las actividades de llenado de cavidades y siembra, limpieza y mantenimiento y riego, además del precio de la semilla para esa fecha.

Además del análisis de costos de los sustratos de forma independiente, se evaluaron también los costos de los sustratos en combinación con tres tipos de fertilizantes: fertilizante de liberación controlada (FLC), fertilizante hidrosoluble (HS) y biofertilizante con micorrizas (M).

De los tres tipos de fertilizantes evaluados, el fertilizante hidrosoluble (HS) resultó ser el más caro en general, con el sustrato testigo alcanzó un precio de \$14.20 por litro. En contraste, el biofertilizante con micorrizas (M) fue el más económico, con el sustrato S2 alcanzó el precio más bajo de \$7.15 por litro.

Aunque los costos de los sustratos y fertilizantes son factores cruciales para determinar la viabilidad económica de la producción de plantas de palma de aceite, es fundamental evaluarlos con los resultados relacionados con el desarrollo y crecimiento de las plantas. En este estudio, se demostró que los tratamientos S6\_FLC, Testigo\_FLC, S4\_FLC, S5\_FLC y S1\_FLC favorecieron el mayor crecimiento en altura de las plantas de palma de aceite. En cuanto al diámetro, los sustratos que mostraron un mejor desempeño fueron el Testigo, S4 y S1 con fertilización de liberación controlada.

En términos de costos, los sustratos más baratos fueron el S2 (\$7.38 L<sup>-1</sup>), seguido del S3 (\$10.88 L<sup>-1</sup>), sin embargo, los tratamientos más económicos que produjeron las mejores variables de crecimiento (tanto en altura como en diámetro) fueron el S4\_FLC (\$11.50 L<sup>-1</sup>), S1\_FLC (\$12.10 L<sup>-1</sup>) y S6\_FLC (\$12.65 L<sup>-1</sup>). La producción de plántulas depende de dos factores

claves: el costo de la adquisición y la disponibilidad de materiales adecuados para la formulación de sustratos (Meneghelli *et al.*, 2017). El sustrato ideal será aquel que esté fácilmente disponible cerca del vivero, con el fin de minimizar el esfuerzo laboral y los costos (Escobar & Buamscha, 2012). Aunque el tratamiento S2\_FLC fue el más barato por contener en mayor proporción raquis de palma de aceite y su cercanía al vivero, los resultados de crecimiento de las plantas fueron ligeramente inferiores a los del Testigo\_FLC (Tabla 4) y las concentraciones nutrimentales (Tabla 5) se encuentran dentro de los valores de los mejores tratamientos (Testigo\_FLC, S4\_FLC y S6\_FLC) encontrados en esta investigación. Por lo que se recomendaría optimizar su composición y mejorar sus propiedades, con el objetivo de incrementar su efectividad en el desarrollo y crecimiento de las plantas.

Adicionalmente, en cuanto a la concentración de macronutrientes, los tratamientos S4\_FLC y S6\_FLC resultaron ser los tratamientos con valores nutricionales más cercanos al tratamiento Testigo\_FLC, lo que podría haber influido positivamente en su desempeño en términos de crecimiento. Esto resalta la importancia de considerar los aspectos del costo y la composición nutricional de los sustratos como factores determinantes en la viabilidad técnica de las plantas.

### Costo por hectárea

El costo de una plantación de palma de aceite incluye la producción de una planta sana y productiva. En la fase de plántula, se requiere de un total de 24 litros de sustrato para la producción de 150 plántulas, suficiente para la siembra de una hectárea. Se estima que con la técnica convencional (sustrato testigo con fertilizante de liberación controlada), el costo de sustrato y fertilizante para generar estas 150 plántulas asciende a \$331.20, según el costo por litro de sustrato (Tabla 6). En contraste, al emplear la opción más eficiente

(sustrato S2 con fertilizante de liberación controlada), el costo se reduce a \$177.12, lo que representa un ahorro del 53.47% respecto a la técnica convencional.

## CONCLUSIONES

Los sustratos S4 (Cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo (3:1.5:0.5)) y S6 (Fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro (3:1:1)) con el fertilizante de liberación controlada (FLC) se presentaron como alternativas viables al sustrato comercial Testigo con FLC (turba: fino de eucalipto (3:2)).

Los sustratos S4 (cáscara de cacao: aserrín de cedro: carbón de coquillo, 3:1.5:0.5) y S6 (fibra de coco: cáscara de cacao: aserrín de cedro, 3:1:1) combinados con fertilizante de liberación controlada (FLC) se presentan como alternativas viables al sustrato comercial Testigo con FLC (turba: fino de eucalipto, 3:2). Por su parte, S2 (raquis de palma de aceite: aserrín de cedro: carbón de coquillo: cáscara de cacao, 3:1:0.5:0.5) con FLC mostró el menor costo de producción y un desarrollo morfológico de las plántulas dentro de los rangos reportados por investigadores y comercializadores de semillas de palma de aceite (PalmElit). Además, sus concentraciones de nutrientes se ubicaron dentro de los intervalos de los tratamientos de mejor desempeño (Testigo\_FLC, S4\_FLC y S6\_FLC), lo que indica que S2 constituye una alternativa económica viable. Se recomienda optimizar su composición para potenciar su eficacia en el crecimiento de las plántulas.

La aplicación de fertilizante de liberación controlada mostró un desempeño superior frente al fertilizante hidrosoluble y al biofertilizante con micorrizas en el crecimiento y desarrollo de plántulas de palma de aceite en etapa previvero. Asimismo, el pH constituye un factor clave para la disponibilidad de nutrientes minerales. Asimismo, el pH se identificó como un factor clave, dado que influye directamente en la disponibilidad de nutrientes minerales para las plantas.

## Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), al Colegio de Postgraduados y a CIRAD-PALMELIT por el financiamiento y apoyo proporcionado para la realización de esta investigación.

A la empresa Prolade SAPI de CV por su disposición de personal y materiales en su vivero de palma de aceite “La Razón” para el establecimiento del experimento. En especial al Ing. Leandro Santos López y al Ing. Juan Andrés Méndez García por compartir sus experiencias y acompañamiento en el experimento en campo.

**Funding.** This work was developed within the framework of the collaborative research project Cirad-PalmElit No. 2021/17, and No. 2024/15 OptIPalMex (Optimización inclusiva de la producción de palma aceitera mexicana), funded by the Study and Support Fund for the Private Sector Green Innovation (FASEP Innovation verte) of the French Treasury Directorate General (FASEP AC/1301/MEXIQUE PALMELIT). Project leaders: Laurene Feintrenie, Cirad, UMR TETIS, [laurene.feintrenie@cirad.fr](mailto:laurene.feintrenie@cirad.fr); Xavier Lacan, PalmElit, [xavier.lacan@palmelit.com](mailto:xavier.lacan@palmelit.com).

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Compliance with ethical standards.** Do not apply.

**Data availability.** The datasets generated during the current study are available from the corresponding author on reasonable request ([dapalma@colpos.mx](mailto:dapalma@colpos.mx))

**Author contribution statement (CRediT).** **K. J. Romero-Bautista** – Investigation, methodology, writing – original draft, **D. J. Palma-López** – Methodology, writing – review and editing, supervision. **C. J. Vázquez-Navarrete** – Resources, supervision. **J. J. Obrador-Olán** – Resources, supervision. **W. Vlamincx** – Methodology, resources, supervision. **A. Aldrete** – Review and editing, supervision. **L. Feintrenie** – Funding acquisition, supervision.

## REFERENCES

- Álvarez-Sánchez, M.E. and Marín-Campos, A., 2011. Manual de procedimientos analíticos de suelo y planta Laboratorio de Química, Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. pp. 42-53.
- Banco de México., 2024. Tipo de cambio peso-dólar estadounidense. Serie histórica. Sistema de Información Económica. <https://www.banxico.org.mx/SieInternet/consultarDirectorioInternetAction.do?sector=6&accion=consultarCuadro&idCuadro=CF102&locale=es>
- Basave-Villalobos, E., Cetina-Alcalá V.M., López-López, M.A., Trejo, C., Ramírez-Herrera, C. and Conde-Martínez, V., 2020. Fertilización de *Pithecellobium dulce* (Roxb.). Benth en vivero: efectos de la calidad de planta. *Madera y Bosques*, 26(3), p. e2632059. <https://doi.org/10.21829/myb.2020.2632059>
- Bremner, J.M., 1965. Total Nitrogen. In: Norman, A.G. (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part 2*

- Chemical and Microbiological Properties No. 9.2. Am. Soc. of Agronomy. Madison, WI, USA, pp. 1149-1178. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.c32>
- Di Rienzo, J.A., Casanoves, F., Balzarini, M.G., Gonzalez, L., Tablada, M. and Robledo, C.W., 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>
- Escamilla-Hernández, N., Obrador-Olán, J.J., Carrillo-Ávila, E. and Palma-López, D.J., 2015. Uso de fertilizantes de liberación controlada en plantas de teca (*Tectona grandis*), en la etapa de vivero. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(3), pp. 329-333. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v38n3/v38n3a12.pdf>
- Escobar, R.R. and Buamscha, M.G., 2012. Sustrato o medio de crecimiento. In: M.G. Buamscha, L.T. Contardi, R.K. Dumroese, J.A. Enricci, R.R. Escobar, H.E. Gonda, D.F. Jacobs, T.H. Landis, T. Luna, J.G. Mexal, and K.M. Wilkinson, (eds) Producción de plantas en viveros forestales. Colección Nexos. Buenos Aires, Argentina pp. 89-98 [https://ciefap.org.ar/documentos/pub/Produc\\_plantas\\_viv.pdf](https://ciefap.org.ar/documentos/pub/Produc_plantas_viv.pdf)
- FEMEXPALMA., 2023. *Revista P de Palma, Edición 5*. [https://femexpalma.com.mx/noticias/wp-content/uploads/2023/09/Revista-P-de-Palma-Edicion-5\\_1.pdf](https://femexpalma.com.mx/noticias/wp-content/uploads/2023/09/Revista-P-de-Palma-Edicion-5_1.pdf)
- FEMEXPALMA., 2024. Anuario estadístico 2024. Villahermosa, Tabasco: S/E. <https://femexpalma.com.mx/wp-content/uploads/2025/01/ANUARIO-ESTADISTICO-FEMEXPALMA-2024-EDICION-ALTA-CALIDAD-.pdf>
- Foth, H.D., 1992. Fundamentos de la ciencia del suelo. 5a. Reimpresión. CECSA. México. 433 p.
- Frerichs, C., Daum, D. and Pacholski, A.S., 2020. Ammonia and ammonium exposure of basil (*Ocimum basilicum* L.) growing in an organically fertilized peat substrate and strategies to mitigate related harmful impacts on plant growth. *Frontiers Plant Science*, 10, p. 1696. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01696>
- Haase, D.L., Dumroese, R.K., Wilkinson, K.M. and Landis, T.D., 2015. Tropical Nursery Concepts and Practices. En: Tropical Forestry Handbook. USDA. pp. 1-30 [https://doi.org/10.1007/978-3-642-54601-3\\_142](https://doi.org/10.1007/978-3-642-54601-3_142)
- Huang, J., Fisher, P.R., Argo, W.R., Jeong, K.Y. and Altland, J., 2025. Macronutrient solubility in response to the pH of soilless container substrates. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* pp. 3224–3240 <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02331-0>
- Just, B.S., Marks, E.A.N., Roquer-Beni, L., Llenas, L., Ponsà, S. and Vilaplana, R., 2024. Biofertilization increases soil organic carbon concentrations: results of a meta-analysis. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 22(1). <https://doi.org/10.1080/14735903.2024.2361578>
- Landis, T.D., Tinus, R.W., McDonald, S.E. and Barnett, J.P., 1990. Containers and Growing Media, Vol. 2, The Container Tree Nursery Manual. Agric. Handbook. 674. U.S. Department of Agriculture, Forest Service Washington, DC: 88p.
- Landis, T.D., Jacobs, D.F., Wilkinson, K.M. and Luna, T., 2014. Growing media. In: K.M. Wilkinson, T.D. Landis, D.L. Haase, B.F. Daley, and R.K. Dumroese, (Eds.). 9 Tropical Nursery Manual. A guide to starting and operating a nursery for native and 10 traditional plants. Agriculture Handbook 732. United States Department of Agriculture, Forest Service. Washington, DC., USA. pp. 101-122.
- LARC-POWER., 2022. Langley Research Center (LaRC) Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Project funded through the NASA Earth Science/Applied Science Program. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Lazcano-Bello, M.A., Sandoval-Castro, E., Tornero-Campante, M.A., Hernández-Hernández, B.N., Ocampo-Fletes, I. and Díaz-Ruiz, R., 2021. Evaluación de sustratos, solución nutritiva y enraizador en producción de plántulas de jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(1), pp. 77-88. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i1.2450>
- Meneghelli, L.A.M., Monaco, P.A.V.L., Haddade, I.R., Meneghelli, C.M., Krause, M.R. and Vieira, G.H.S., 2017. Produção de mudas de café arábica em substrato composto de



- resíduo da secagem dos grãos. *Coffee Science*, 12, pp. 381-388.
- PalmElit., 2008. Germinated oil palm seed. Recommendations for prenursery and nursery management. CIRAD. Montferrier-sur-Lez, Francia.  
<https://www.palmelit.com/en/content/download/4353/32854/version/4/file/Booklet-of-recommendations-for-prenursery-and-nursery-management-oil-palm-seeds-CIRAD.pdf>
- Priya, E., Sudipta, S. and Pradip, K.m., 2024. A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(4), p. 113211  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113211>
- Rosenani, A.B., Rovica, R., Cheah, P.M. and Lim, C.T., 2016. Growth Performance and Nutrient Uptake of Oil Palm Seedling in Prenursery Stage as Influenced by Oil Palm Waste Compost in Growing Media. *International Journal of Agronomy*. 18(4), pp. 240-243.  
<https://doi.org/10.1155/2016/6930735>
- Secretaría de Economía., 2008. NMX-FF-109-SCFI-2008: Norma mexicana para humus de lombriz (lombricomposta)-especificaciones y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación. 10 de junio de 2008. México, D. F. pp. 21-22.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2024. Anuario estadístico de la producción agrícola. Disponible en línea [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/)
- Torres, A.P., Camberato, A., López, R.G. and Mickelbart, M.V., 2013. Producción comercial de cultivos bajo invernadero y vivero. Departamento de Horticultura y Arquitectura de Áreas Verdes, Purdue University. Indiana, USA. 5p.
- USGS., 2024. Peat Statistics and Information. Available online.  
<https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/peat-statistics-and-information>
- Van Dam, J., 2016. Subproductos de la palma de aceite como materias primas de biomasa. Palmas, 37 (Especial Tomo II), pp. 149-156.
- Yan, J., Yu, P., Liu, C., Li, Q. and Gu, M., 2020. Replacing peat moss with mixed hardwood biochar as container substrates to produce five types of mint (*Mentha* spp.). *Industrial Crops and Products*, 155, p. 112820.  
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112820>