



APORTE DE LOS RIZOBIOS AL CRECIMIENTO Y NUTRICIÓN MINERAL DE LAS POSTURAS INJERTADAS DE *COFFEA ARABICA* L.

CONTRIBUTION OF RHIZOBIA TO THE GROWTH AND MINERAL NUTRITION OF GRAFTED *COFFEA ARABICA* L. SEEDLINGS

SILFREDO MILANES RIQUENE¹, SUCLEIDI NÁPOLES VINENT², MARÍA CARIDAD NÁPOLES GARCÍA³, IONEL HERNÁNDEZ FORTE³, PEDRO RAMOS STIVENS¹

¹Empresa Agroforestal San Luis, San Luis, Cuba.

²Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Departamento de Agronomía, Santiago de Cuba, Cuba.

³Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, Mayabeque, San José. Cuba.

*Autor para correspondencia: producción@agrofsl.scu.minag.cu

RESUMEN

El empleo de rizobios en el cultivo del café es de gran importancia, ya que promueve un crecimiento más vigoroso de las plantas, mejora la eficiencia en la absorción de nutrientes como el fósforo, reduce la dependencia de fertilizantes químicos y contribuye a una producción más sostenible y económicamente viable. El estudio evaluó el efecto de tres cepas de rizobios (Rpr2, Rpr16 y 8001) en el crecimiento y nutrición mineral de posturas injertadas de *Coffea arabica* L. cv. Isla 5-15 sobre *Coffea canephora* cv. Robusta, con el objetivo de mejorar la sostenibilidad y eficiencia en la producción cafetalera. Se realizó un experimento en dos fases: semillero y vivero, utilizando un diseño completamente al azar y bloques al azar, respectivamente. Las semillas se inocularon con rizobios y se evaluaron variables como porcentaje de germinación, emergencia, altura, diámetro del tallo, biomasa y contenido de fósforo. Los resultados mostraron que la inoculación con rizobios incrementó significativamente la germinación (hasta 96%) y redujo el tiempo de inicio de germinación (23-24 días). Las plántulas inoculadas presentaron mayor altura, diámetro del tallo, número de hojas y longitud de raíces, destacándose la cepa Rpr2 al 75% de fósforo. Además, se observó un aumento en la biomasa fresca y seca, así como en los índices de calidad de las plantas. La inoculación con rizobios demostró ser una alternativa rentable, que reduce costos y dependencia de fertilizantes químicos. Se concluye que la cepa Rpr2 al 75% de fósforo es la más efectiva para mejorar el crecimiento y calidad de las posturas de café, promoviendo una producción más sostenible.

Palabras clave: germinación, biomasa, fósforo, sostenibilidad, inoculación

ABSTRACT

The use of rhizobia in coffee cultivation is of great importance, as it promotes more vigorous plant growth, improves the efficiency of nutrient uptake such as phosphorus, reduces dependence on chemical fertilizers, and contributes to a more sustainable and economically viable production. The study evaluated the effect of three strains of rhizobia (Rpr2, Rpr16, and 8001) on the growth and mineral nutrition of grafted seedlings of *Coffea arabica* L. cv. Isla 5-15 on *Coffea canephora* cv. Robusta, with the aim of improving sustainability and efficiency in coffee production. An experiment was carried out in two phases: seedbed and nursery, using a completely randomized design and randomized blocks, respectively. The seeds were inoculated with rhizobia and variables such as germination percentage, emergence, height, stem diameter, biomass, and phosphorus content were evaluated. The results showed that inoculation with rhizobia significantly increased germination (up to 96%) and reduced the time to germination (23-24 days). The inoculated seedlings had greater height, stem diameter, number of leaves and root length, with the Rpr2 strain at 75% phosphorus standing out. In addition, an increase in fresh and dry biomass was observed, as well as in plant quality indices. Inoculation with rhizobia proved to be a cost-effective alternative, reducing costs and dependence on chemical fertilizers. It is concluded that the Rpr2 strain at 75% phosphorus is the most effective in improving the growth and quality of coffee seedlings, promoting more sustainable production.

Keywords: germination, biomass, phosphorus, sustainability, inoculation

Recibido: 07/1/2022

Aceptado: 01/3/2022

Conflicto de intereses: Los autores declaran no presentar conflictos de interés.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea arabica* L.) es uno de los productos más valiosos para la economía mundial, que genera empleos para millones de personas y representa hasta el 80% de los ingresos por exportación en algunos países (Díaz et al., 2016). Es un producto básico tropical importante, con un consumo global creciente (OIC, 2019), y desempeña un papel crucial en la estructura económica, social y el desarrollo de los países productores. En Cuba, el cultivo de café se concentra en regiones montañosas como el Macizo Guamuhaya y Sierra Cristal, destacándose la especie *C. arabica* (López, 2016). Esta especie produce un café fino y aromático, mientras que *C. canephora* (robusta) ofrece un café rico en cafeína, más fuerte y ácido (Gotteland & De Pablo, 2007).

La producción cafetalera cubana se desarrolla principalmente en la región oriental, con Santiago de Cuba como principal productor, que aporta 4,500 toneladas de *C. arabica* (50% de la producción nacional) y 3,200 toneladas de robusta (30%) (Cantos et al., 2018). Para mejorar la productividad y resistencia a plagas, se emplea el método de injertación hipocotiledonar, utilizando *C. canephora* como patrón resistente a nematodos y *C. arabica* para garantizar calidad física y organoléptica (Reyes et al., 2016). Este método es económico y efectivo, según estudios recientes.

La obtención de plántulas sanas y vigorosas es fundamental para plantaciones productivas (J. Sánchez & Cabrera, 2019). En Cuba, se producen anualmente entre 50 y 60 millones de plántulas de café (GEAM, 2012). Sin embargo, el uso intensivo de fertilizantes y materia orgánica en los sustratos ha llevado a la búsqueda de alternativas biológicas para reducir costos y mejorar la sostenibilidad (Díaz et al., 2016). El fósforo (P) es un nutriente limitante debido a su alta reactividad en el suelo, lo que incrementa el uso de fertilizantes químicos y los costos de producción (Martins et al., 2013; Reis et al., 2011).

Los microorganismos del suelo desempeñan un papel esencial en la fertilidad y el reciclaje de nutrientes en sistemas agroforestales de café. Géneros como *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Pseudomonas* y *Bacillus* han sido informados por su capacidad para solubilizar fosfatos y promover el crecimiento vegetal (Muleta et al., 2013; Alcarraz et al., 2019). La inoculación con bacterias beneficiosas, como los rizobios, representa una alternativa sostenible para mejorar el desarrollo del café y otras especies no leguminosas (Cisneros et al., 2017; Pérez et al., 2019). Estudios han demostrado su efectividad en cultivos como *Moringa oleifera*, *Theobroma cacao* y *Zea mays* (Mazher et al., 2014; Suparno et al., 2015; Pérez et al., 2019).

Este trabajo evaluó el efecto de tres aislados bacterianos de rizobios promotores de crecimiento vegetal en *Coffea arabica* cv. Isla 5-15 y *Coffea canephora* cv. Robusta en sus primeros estadios, en el Consejo Popular La Caoba, municipio San Luis.

El objetivo fue contribuir a una producción cafetalera más sostenible y eficiente, reduciendo el impacto ambiental y los costos asociados al uso de fertilizantes químicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la campaña 2020-2021 en el municipio San Luis con una extensión territorial de 764.9 Km², que representa el 18,5 % de área total de la provincia Santiago de Cuba. La zona se encuentra a una altitud de 550 metros sobre el nivel del mar, con una precipitación media anual que oscila entre 500 y 1000 mm. La temperatura promedio es de 24°C, y la humedad relativa alcanza el 60%. El suelo presenta una textura arcillo limosa y un pH de 6.7, con un drenaje natural eficiente. La topografía del terreno es ondulada, con pendientes que varían entre el 15% y el 30%, clasificadas como moderadas a fuertes. Estas condiciones climáticas y edáficas hacen del área un entorno con características particulares para el desarrollo de café y otros cultivos.

Se emplearon semillas de *Coffea arabica* cultivar Isla 5-15 (Isla 5-15) y *Coffea canephora* cultivar Robusta (Robusta), que son de alto potencial productivo por debajo de los 300 msnm (Tabla 1). Se utilizaron tres cepas de rizobios provenientes del cepario del Laboratorio de Microbiología del Departamento de Fisiología y Bioquímica Vegetal del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA). Las cepas provinieron de la rizosfera de plantas de arroz (*Oriza sativa*) y de nódulos de soya (*Glycine max*).

Tabla 1. Descripción de los tratamientos para la fase 1 (semillero).

Tratamientos	Cepas	Cultivar
T1 Control absoluto		
T2 <i>Rhizobium alamii</i>	Rpr2	Isla 5-15
T3 <i>Rhizobium sp.</i>	Rpr2 Rpd16	Isla 5-15
T4 <i>Bradyrhizobium elkanii</i>	ICA 8001	Isla 5-15
Tratamientos	Cepas	Cultivar
T1 Control absoluto		
T2 <i>Rhizobium alamii</i>	Rpr2	Robusta
T3 <i>Rhizobium sp.</i>	Rpr2 Rpd16	Robusta
T4 <i>Bradyrhizobium elkanii</i>	ICA 8001	Robusta

Se emplearon inóculos de las cepas de rizobios. Para ello, se partió de pre inóculos a partir de cepas conservadas en medio Levadura Manitol (LM) sólido (Vincent, 1970) a 4 °C, se inocularon erlenmeyers de 100 mL con 10 mL del medio de cultivo líquido. Posteriormente se incubaron en una zaranda termostalada a 150 rpm y 28 °C, en oscuridad durante 20 h. Se inocularon erlenmeyers de 500 mL con 100 mL de medio LM estéril, los que se incubaron en las mismas condiciones.

Los inoculantes presentaron una concentración celular de 1×10^{10} UFC·mL⁻¹ determinada por el método de diluciones decimales seriadas (10^{-4} - 10^{-5}).

Se establecieron dos fases, el pregerminador (semillero) se constituyó como la fase 1 y el propagador (vivero) la fase 2.

La unidad experimental fue de 400 semillas con cuatro repeticiones en cada especie en un diseño completamente al azar. Para comparar los promedios de los tratamientos se utilizó la prueba de Rangos Múltiples de Tukey al 5% de significación.

El experimento constó de 4 tratamientos, cada uno con 4 repeticiones, lo que sumó 16 unidades experimentales en total (Figura 1). Cada unidad ocupó un área de 1 m², resultando en un área neta del experimento de 16 m². Para garantizar un crecimiento adecuado y uniforme, la distancia entre semillas se estableció en 0,05 metros. Los pregerminadores contenían 6 m³ de arena de río lavada y tamizada con una malla de 2 x 2 de 11,7 mm de abertura y 1,04 mm de diámetro. Esta arena fue caracterizada químicamente, mostrando contenidos de 75,17 de P₂O₅, 22,6 de K₂O, 6,75 de pH en agua, 0,38 de materia orgánica; 31,47, 13,61 y 0,33 de calcio, magnesio y sodio, respectivamente. Se sembraron 0,4 kg de semillas para el cultivar arábico y 0,44 kg para el cultivar robusta, lo que resultó en 1600 semillas por tratamiento con un 18% de humedad, sin desinfectar.

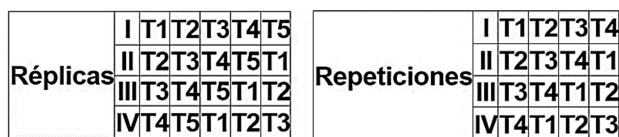


Figura 1. Croquis del diseño experimental de implantación de semillero y vivero de café para la investigación.

Las semillas se embebieron durante 1 hora en inoculantes bacterianos, a razón de 1 mL por semilla, mientras que el tratamiento control consistió en semillas no inoculadas. Previamente, se realizó una selección de semillas, descartando aquellas con defectos como grano caracol, grano triángulo, grano monstruo, grano pequeño y semilla brocada o lastimada. Para prevenir enfermedades, el sustrato se desinfectó con el fungicida orgánico de amplio espectro Daconil® (clorotalonil) a una concentración de 3,5 cc·L⁻¹ de agua, aplicado tres días antes de la siembra mediante una bomba de mochila, con el fin de controlar la aparición de *R. solani*.

Los canteros pregerminadores se colocaron bajo una tela serán con un sombreado del 50% para evitar la incidencia directa de los rayos solares. Las semillas se sembraron a 1 cm de separación entre ellas y a 2,5 cm de profundidad, en surcos separados a 5 cm. Se estableció una diferencia de 15 días en la siembra entre los cultivares, sembrando primero el cultivar robusta. Después de la siembra, las camas se cubrieron con hojas secas de Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) para crear condiciones adecuadas de humedad y temperatura,

además de protegerlas de la acción directa del agua de riego o lluvia (Mag & Gad, 2016). Estas hojas se retiraron al momento de la emergencia.

Se realizaron tres o cuatro riegos semanales con agua corriente, en dependencia de las condiciones climáticas, con regaderas plásticas manuales. La deshierba manual se llevó a cabo a los 17 y 32 días después de la siembra para eliminar malezas que competían por nutrientes. A los 65 días después de la siembra, se procedió al injerto tipo hendidura o hipocotiledonar, según las indicaciones de la Asociación Nacional de Café (ANACAFE, 2017), cuando el patrón estaba en estado de “mariposa” y la yema en estado de “fosforito”.

Variables evaluadas

- Porcentaje de germinación (PG) (%): Se consideró como semilla germinada aquella donde el hipocotilo emergía en forma de “bastoncito” a la superficie (Solomon et al., 2001). Se determinó a los 30, 40 y 50 días, mediante la fórmula: % G = (Número de semillas germinadas / Número de semillas sembradas) x 100 (Ede et al., 2015).
- Número de semillas germinadas (NSG): Se cuantificaron durante 50 días, contabilizando cada cinco días (25, 30, 35, 40, 45 y 50) (Coa et al., 2014).
- Velocidad de germinación (VG): Se calculó mediante la fórmula: $IVG = \sum (Ni / Ti)$, donde Ni es el número de semillas germinadas y Ti el tiempo transcurrido desde la siembra (Terry et al., 2014).
- Días al inicio de la germinación (DIG): Se evaluaron desde la siembra hasta la emergencia de la primera plántula (Ortiz et al., 2018).
- Porcentaje de Emergencia, PE (%): Se calculó a los 60 días de la siembra, contando las plántulas en estado fosforito y transformando el resultado en porcentaje respecto a las 400 semillas sembradas por unidad experimental (Ortiz et al., 2018).

Análisis estadístico

Los datos se analizaron mediante estadígrafos descriptivos. Se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnoff para verificar la normalidad de la distribución, seguida de un análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey al 5% (Reyes, 2014).

Análisis económico

Según la metodología del análisis de presupuesto parcial, se calculó el beneficio bruto por semilla en función del número de plántulas trasplantables por tratamiento. Los costos variables por semilla sembrada se restaron del beneficio bruto para obtener el beneficio neto (Evans, 2014). Los tratamientos se ordenaron de manera decreciente según el beneficio neto, y se realizó un análisis de dominancia y marginal para determinar la Tasa Interna de Retorno Marginal (TIRM), identificando las mejores opciones económicas.

En la Fase 2, correspondiente al propagador o vivero, se utilizó material vegetal consistente en plántulas de café del cultivar Isla 5-15 injertadas sobre Robusta (Tabla 2), las cuales fueron obtenidas de la Fase 1 (semillero). Para el desarrollo de esta fase, se implementó un diseño experimental de bloques al azar con 4 repeticiones o bloques. Con el fin de garantizar la validez de los resultados, se verificó la normalidad de los datos obtenidos en los diferentes experimentos mediante la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov, mientras que la homogeneidad de la varianza se evaluó mediante la prueba de Bartlett.

Tabla 2. Descripción de los tratamientos empleados en el propagador.

Tratamientos	Cepas
T1 Control productivo	100 % de PF
T2 <i>Rhizobium alamii</i> Rpr2	100 % de PF
T3 <i>Rhizobium alamii</i> Rpr2	75 % de PF
T4 <i>Rhizobium alamii</i> Rpr2	50 % de PF
T5 <i>Rhizobium alamii</i> Rpr2	25 % de PF

PF: portador fosfórico. Fuente Autores.

El experimento se diseñó con un total de 5 tratamientos, cada uno con 4 repeticiones, lo que resultó en 20 unidades experimentales. Cada unidad experimental cubrió un área total de aproximadamente 1.20 m², con 120 plantas, aunque el área neta por unidad fue de 0.54 m², correspondiente a 54 plantas. El área total del experimento fue de 127.08 m². Cada unidad experimental consistió en 8 filas, con 15 plantas por fila, y se establecieron pasillos de 0.60 m de ancho para facilitar el manejo. El análisis del sustrato utilizado se realizó en el laboratorio de suelos de la provincia de Granma, Cuba.

En la CPA Camilo Cienfuegos se llevó a cabo la etapa del propagador (vivero) en una zona de pendiente moderada (12-25 %), caracterizada por un buen drenaje, lo que permitió la instalación adecuada del almácigo. Se utilizó un tipo de vivero con umbráculo, y se seleccionó un área cercana a la fase 1 de semillero para facilitar el trasplante inmediato hacia el mismo. Posteriormente, se delimitaron las unidades experimentales y los caminos de acuerdo con el diseño experimental aplicado.

Para la reinoculación de las plántulas injertadas, se sumergió su sistema radicular en un vaso que contenía 1 mL del inóculo diluido en 9 mL de agua, alcanzando un volumen final de 10 mL. Este proceso se realizó durante treinta minutos a temperatura ambiente y bajo condiciones de sombra (Cisneros et al., 2017). Para evitar la deshidratación, las plántulas injertadas se mantuvieron a raíz desnuda sobre bandejas con papel toalla kraft, el cual se humedeció constantemente con un pulverizador.

Se emplearon bolsas de polietileno negro de 17 x 23 cm, con una capacidad de 1 kg-1 de sustrato, en las cuales se colocó una planta injertada. El sustrato consistió en una mezcla de suelo Ferralítico rojo (A. Hernández et al., 2015) y cachaza como materia orgánica, en una proporción de 2:1 (v:v), complementada con fertilización fosfórica mediante superfosfato triple (SFT), a razón de 10,9 kg m⁻³ de la mezcla. Los sustratos se establecieron volumétricamente según los porcentajes de cada componente dentro de los tratamientos en estudio, y cada sustrato se mezcló tres veces al voltear el material con una pala de punta redondeada.

Las plántulas trasplantadas a fundas de vivero, llenas con el sustrato correspondiente, se ubicaron dentro de un umbráculo de techo construido con pencas de guano. Este umbráculo tenía una altura mínima de 2,10 m y estaba sostenido por una estructura de alambres lisos, manteniéndose así durante toda la fase de vivero.

En cuanto al manejo agronómico en esta fase, se aplicó mensualmente urea al 1 % (1 kg de urea en 100 L de agua) de manera foliar, una vez que las posturas desarrollaron el tercer par de hojas verdaderas. Los riegos se realizaron con frecuencia para mantener el sustrato en capacidad de campo. El control de malezas se llevó a cabo de forma manual para evitar daños a las plántulas de café. Dado que la incidencia de enfermedades no superó el 5 % en el vivero, no fue necesario implementar un manejo específico para el control de enfermedades.

Durante el trasplante, las plántulas se posicionaron correctamente para asegurar un buen anclaje, introduciéndolas a mayor profundidad en el agujero realizado en el sustrato. Luego, se elevó la planta hasta el nivel de la unión del tallo y la raíz, y se aporcó a los lados con un palo de madera o un cuchillo.

Variables evaluadas

Se evaluaron 10 posturas seleccionadas al azar por unidad experimental de manera mensual hasta los 210 días (d). Las variables analizadas en estas posturas a los 90, 120, 150 y 210 días incluyeron:

- Altura de planta (cm): se midió la longitud del tallo desde la base hasta el ápice.
- Diámetro de tallo (mm): la medición se realizó a un centímetro por encima de la zona de injerto.
- Número de hojas: se registró el aumento del órgano según la metodología descrita por Julca et al. (2018).

A los 210 días, también se determinó el contenido de fósforo en el vegetal y en el sustrato. Además, se evaluaron las siguientes variables:

- Masa seca de planta (g): se separaron las partes aéreas y las raíces de cada planta, las cuales se colocaron en una estufa a 75 °C hasta alcanzar un peso constante.

- Área foliar (cm²): se estimó utilizando el método propuesto por Soto (1980), basado en las dimensiones lineales de la hoja.
- Relación parte aérea/raíz: se calculó mediante el cociente entre el peso seco aéreo y el peso seco radical (Jácome et al., 2019).
- El índice de esbeltez (IE) se determinó en función del peso seco total, la altura de la planta y el diámetro del tallo, mediante la fórmula A/D (Julca et al., 2018).
- El índice de calidad de Dickson (ICD) integró la masa seca total de la planta, el IE y la relación parte seca aérea/parte seca radical, mediante la fórmula $MST/[(A/D) + (MSPA/MSR)]$ (Encalada, 2017).

En estas fórmulas, D representa el diámetro del tallo (mm), A la altura de la planta (cm), MST el peso seco total (g), MSPA la masa seca de la parte aérea (g) y MSR la masa seca de la raíz (g).

Análisis estadísticos de los datos

En la etapa de propagador, se empleó un diseño de bloques al azar (DBA). Una vez realizadas las evaluaciones, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) y la comparación de medias mediante la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 %. Para este análisis, se utilizó el software estadístico SPSS versión 19 para Windows.

Análisis económico

El análisis económico se realizó según la metodología del análisis de presupuesto descrita en la etapa del pregerminador. Este proceso permitió evaluar los costos y la viabilidad económica del estudio en función de los resultados obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentaje de germinación (PG)

Al analizar el comportamiento de la germinación de las semillas de caféo Isla 5-15 y Robusta en los tres momentos de evaluación posteriores a la siembra (Fase 1), se observó que la inoculación con las tres cepas de rizobios ejerció un efecto positivo significativo en este proceso en comparación con sus respectivos controles (Figura 2). En la especie *C. canephora*, a los 30 días, las cepas de rizobios Rpr2, Rpr16 y 8001 mostraron un comportamiento similar, con porcentajes de germinación de 28,0 %, 33,33 % y 33,67 %, respectivamente, superando significativamente al control, que registró solo un 6,33 %. A los 40 días, las cepas bacterianas mantuvieron un comportamiento similar, alcanzando porcentajes de 93,33%, 94,0 % y 91,33 %, mientras que el control obtuvo un 73,67 %. A los 50 días, el porcentaje de germinación (PG) de las semillas inoculadas con Rpr2 fue de 96,0 %, con Rpd16 de 95,33 % y con la cepa 8001 de 94,33 %.

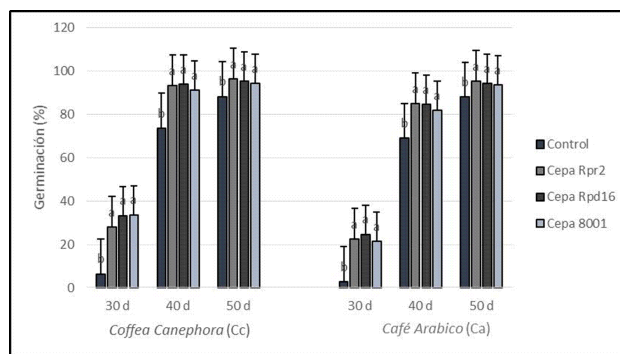


Figura 2. Germinación en semillas de café en función de la inoculación de rizobios. Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).

Por otro lado, a los 30 días, el porcentaje de emergencia (PE) en *C. arabica* fue de 2,67 % en el control, siendo superado significativamente por las semillas inoculadas con las cepas de rizobios en estudio, las cuales mostraron un comportamiento similar. A los 40 y 50 días, los porcentajes de emergencia superaron el 82,0 % y 93,0 %, respectivamente (Figura 2). La inoculación con las cepas de rizobios permitió obtener los mejores resultados, los cuales difirieron significativamente de los controles en ambos cultivares.

Los resultados obtenidos en este estudio confirman que las semillas de café inoculadas con bacterias promotoras del crecimiento incrementan el porcentaje de germinación. Este incremento superó el informado por Fernández (2015) en el cultivar de café Típica, donde las semillas inoculadas con cepas de *Azotobacter* y *Pseudomonas* alcanzaron valores máximos de 61,7 % y 55,0 %, respectivamente. De manera similar, en este estudio, los tratamientos con bacterias superaron al control sin inocular.

Además, González et al. (2015) observaron que, en la obtención de plántulas de caféo del cultivar “Caturra rojo” (*Coffea arabica* L.), la germinación fue más efectiva con 200 mL·L⁻¹ de Bioenraiz®, logrando porcentajes de 79,4 % y 94,5 % a los 50 y 60 días después de la siembra, respectivamente. Estas plántulas también presentaron mejores variables evaluadas en comparación con otros tratamientos.

Este efecto puede atribuirse a la capacidad de las cepas de rizobios para producir compuestos indólicos (I. Hernández & Nápoles, 2017, 2019), los cuales están involucrados en procesos como el alargamiento y la división celular, así como en la diferenciación de tejidos, cambios que acompañan a la germinación. Se sugiere que las auxinas ejercen una acción positiva sobre estos procesos relacionados con el sistema radical, lo que reduce la presión de la pared celular e induce la síntesis de enzimas específicas. Esto aumenta la plasticidad de la pared celular y favorece la germinación (González et al., 2015).

Los resultados obtenidos son similares a los informados por Coa et al. (2014) al utilizar la escarificación mecánica (lijado del pergamino) y la inmersión en agua durante 24 y 48 horas a los 25 días. En las semillas inoculadas con las tres cepas, el PG osciló entre 22,33 % y 24,67 %, sin embargo, Gebreselassie et al. (2010) encontraron que las semillas de *C. arabica* remojadas durante 12 horas solo tuvieron un 13,28 % de emergencia.

La imbibición de las cepas bacterianas promotoras del crecimiento durante una hora permitió alcanzar porcentajes entre 82,0 % y 85,0 %. Sin embargo, Mohammed et al. (2013) alcanzaron un 76,47% de germinación a los 45 días con un remojo de 72 horas. Las semillas tratadas con rizobios demostraron ser factibles para mejorar el PE en la mayoría de las fechas de evaluación (30, 40 y 50 días) tanto en *C. arabica* como en *C. canephora*.

Número de semillas germinadas

En el conteo acumulativo en el estadio 00-05 de crecimiento del cafeto (Figura 3), se observan diferencias significativas en la cantidad de semillas germinadas entre los tratamientos con presencia de cepas bacterianas y aquellos sin ellas. Esta expansión fue mucho más precoz en los tratamientos con cepas bacterianas, comenzando aproximadamente a partir de los 35 días, en ambos cultivares. Por otro lado, los controles mostraron una cantidad inferior de semillas germinadas en los seis momentos de evaluación, y requirieron un mayor tiempo para alcanzar un número similar de germinaciones en comparación con los tratamientos que incluían cepas bacterianas.

Respecto a la precocidad de emergencia, los resultados confirman hallazgos previos informados por varios autores. Se ha observado que una semilla con endocarpio presente (pergamino) germina entre los 50 y 70 días (Ortiz et al., 2018). Sin embargo, con la inoculación de rizobacterias promotoras del crecimiento (RPCV), se acelera tanto la germinación como la emergencia. Esto se debe a una colonización eficiente por parte de los microorganismos, que incluye su capacidad para sobrevivir después de la inoculación y crecer en la espermosfera (región que rodea la semilla) en respuesta a los exudados producidos por la semilla (Noumavo et al., 2016). Además, los niveles endógenos de compuestos auxínicos juegan un papel importante, ya que la respuesta a la aplicación exógena de estos compuestos depende de factores como su disponibilidad intracelular en forma libre o conjugada (González et al., 2015).

Porcentaje de Emergencia (PE) %

En cuanto al análisis del porcentaje de emergencia (PE), se evidencia que la aplicación de cepas de rizobios favorece significativamente esta variable, superando a los controles (Figura 4). Al comparar los cultivares Robusta e Isla 5-15 en presencia de estas cepas, se observa que el café Robusta

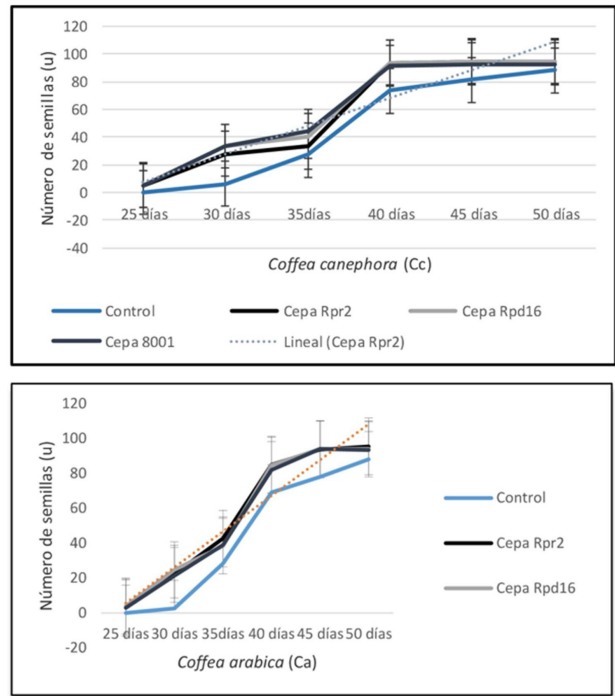


Figura 3. Distribución de la germinación del *C. canephora* cv. Robusta y *C. arabica* cv. Isla 5-15 con inoculación de rizobios. Las barras indican el intervalo de confianza (Tukey $p < 0.05$).

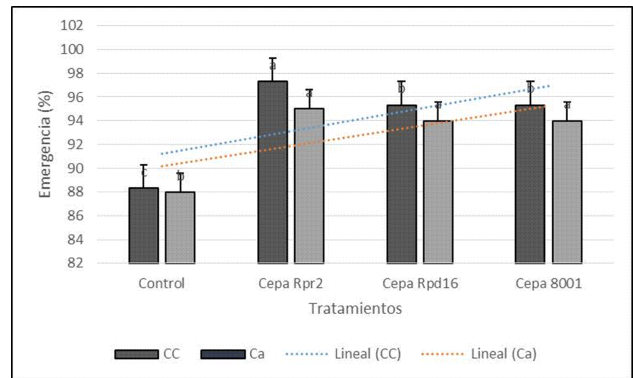


Figura 4. Emergencia en semillas de (*Coffea arabica* L.) y *Coffea canephora* en función de las inoculaciones con rizobios, en semillero evaluadas a los 66 días después de la siembra. Las barras indican el intervalo de confianza (Tukey $p < 0.05$).

inoculado presentó un PE mayor en un 10 %, 8 % y 8 % en comparación con el café arábico, que registró un 7 %, 6 % y 6 % ($p \leq 0.05$). Además, en el café Robusta, las cepas estudiadas mostraron diferencias significativas en el PE, destacándose la cepa Rpr2 con un 97,3 %, seguida por las cepas Rpr16 y 8001 con un 95,33 %. Los valores más bajos de PE se registraron en las semillas no inoculadas.

Por otro lado, en el café Isla 5-15, las cepas estudiadas no mostraron diferencias significativas entre sí, pero sí marcaron un efecto significativo en comparación con el control

(Figura 4). Esto indica que, aunque no hubo variaciones notables entre las cepas, su presencia tuvo un impacto positivo en el PE en relación con los tratamientos sin inoculación.

Valores similares a los obtenidos en este estudio, en cuanto al porcentaje de emergencia de semillas en condiciones controladas y semicontroladas, se informaron en investigaciones previas. La selección de rizobios por su efecto en la germinación y desarrollo incipiente de *Moringa oleifera* Lam. en condiciones controladas; la germinación y crecimiento de plántulas de pimentón y lechuga inoculadas con rizobios; y la identificación molecular de las cepas, así como el aislamiento y caracterización de metilobacterias de la filosfera de la hoja de tomate y su efecto en el crecimiento de las plantas (Senthilkumar & Krishnamoorthy, 2017; Bécquer et al., 2018; Blanco et al., 2018).

Los valores del porcentaje total de semillas emergidas en los cultivares de café estudiados superaron los obtenidos en el cultivar de café Típica, inoculado con cepas de *Azotobacter* y *Pseudomonas* (Fernández, 2015). Este autor informó un incremento de aproximadamente el 60.0 % en condiciones experimentales similares, mientras que, en el presente estudio, algunas cepas de rizobios incrementaron la germinación en más del 70,0 %.

Los resultados de emergencia obtenidos en este ensayo fueron similares a los encontrados por Blanco et al. (2018) en el cultivo de *Capsicum annuum*, superiores a los de *Lactuca sativa* e inferiores a los informados por Bécquer et al. (2018) en la evaluación de ocho aislados nativos de *Bradyrhizobium* sp. aplicados durante la siembra del cultivo de maíz. El menor valor de porcentaje de emergencia (PE) fue alcanzado por el cultivar arábico, lo que podría estar relacionado con la calidad de la semilla utilizada, la cual podría haber perdido viabilidad debido al contenido de humedad durante su almacenamiento. Además, el efecto de la bacteria sobre la variable en estudio puede variar entre especies o cultivares debido a diferencias genéticas.

Otro aspecto a considerar es que las semillas de café contienen almidón, grasas, azúcares, sacarosa, taninos y cafeína, lo que podría contribuir a la efectividad de la colonización, lo que potencia la interacción benéfica entre el café y los rizobios. Esto permite mecanismos que inducen una respuesta favorable, con un aumento en la absorción de agua y la activación enzimática durante la segunda y tercera etapas del proceso de germinación. Estos factores pueden potenciar la relación entre el metabolismo y el mecanismo de acción hormonal, implicado directamente en todas las fases de desarrollo, especialmente en la fase inicial de germinación de las semillas (Taiz et al., 2017).

Sin embargo, Marquina et al. (2018) encontraron que, en la germinación total del pimentón, diferentes cepas de rizobios aisladas de nódulos de plantas leguminosas de diversas zonas del estado Mérida, Venezuela, lograron que las semillas de pimiento germinaran en un 99,3; 99,3; 99,6 y 99,6 %.

Estas cepas habían sido previamente caracterizadas como fijadoras de nitrógeno, solubilizadoras de fosfatos y productoras de ácido indol acético. En contraste, para la lechuga, las cepas no mostraron un efecto promotor de la germinación en ningún día del experimento, ya que no hubo diferencias significativas entre estos tratamientos y el control no inoculado.

Investigaciones recientes, como las realizadas sobre las actividades probióticas de *Rhizobium laguerreae* en el crecimiento y la calidad de las espinacas, demuestran el efecto selectivo del genotipo de las plantas, expresado en sus exudados radicales, sobre la concentración y la diversidad estructural y funcional de las comunidades microbianas en la rizosfera (Jiménez et al., 2018). Estos estudios sugieren que podría existir una mayor afinidad del cultivar robusta con las cepas Rpr2, Rpr16 y 8001, lo que podría explicar, en parte, las diferencias en el efecto de estas cepas en el PE de los cultivares de café estudiados. El efecto positivo de la inoculación de rizobios en la emergencia de café en ambos cultivares podría deberse a un incremento en la actividad metabólica de las semillas, lo que promovería el crecimiento del embrión, acelerando así la emergencia (Barraza et al., 2016; Kanwar et al., 2014). Además, las auxinas de origen microbiano podrían tener un efecto positivo en la emergencia de las semillas.

Las bacterias promotoras del crecimiento de las plantas (PGPB) ejercen un efecto fitoestimulador como parte de los mecanismos que promueven el crecimiento vegetal. La producción de fitohormonas, como el ácido indolacético (AIA) y las giberelinas por estas bacterias, favorece la germinación de las semillas (I. Hernández et al., 2015; Parray et al., 2016). El AIA es una de las hormonas más importantes debido a sus efectos reguladores, ya que participa en la división celular, la elongación y la diferenciación celular (Vega et al., 2016). La división y el alargamiento celular en el embrión provocan la rotura de las cubiertas seminales, lo que generalmente ocurre por la emergencia de la radícula que sale fuera del pergamino (Coa et al., 2014). Investigaciones previas demostraron que algunas cepas utilizadas en este estudio, como Rpr16 y Rpr2, producen compuestos indólicos del tipo AIA (I. Hernández & Nápoles, 2019). La producción de estos compuestos podría haber influido en la germinación de las semillas de ambos cultivares de café.

La caracterización realizada por Hernández et al. (2015) a cuatro aislados de rizobios y la cepa *B. elkanii* ICA 8001, obtenidos de nódulos de soja, permitió identificar que cuatro de ellos produjeron AIA. Este atributo positivo, presente de manera particular en estas bacterias, podría actuar en conjunto con el AIA producido por las semillas, lo que estimula el porcentaje de semillas germinadas. Aparentemente, las cantidades de AIA emitidas por las diferentes cepas de esta bacteria tienen un efecto limitado en el desarrollo del embrión en relación con el tiempo de aplicación, necesariamente impide su efecto positivo en otras variables fisiológicas de la planta (Bécquer et al., 2018).

Velocidad de germinación (VG)

Esta variable consolida la efectividad de los tratamientos que emplean cepas de rizobios, ya que permite obtener resultados más eficientes en la aceleración de la germinación de las semillas (Figura 5). En la velocidad de emergencia (VE) a los 66 días después de la siembra, se observó un mayor rendimiento con la cepa Rpr2, tanto en *C. arabica* como en *C. canephora* (0.54 y 0.39 plántulas emergidas por día, respectivamente), lo que refleja el vigor de las semillas. Además, en la figura 5 se aprecian diferencias significativas entre la velocidad de germinación de las semillas inoculadas con distintas cepas de rizobios y las no inoculadas para ambos cultivares.

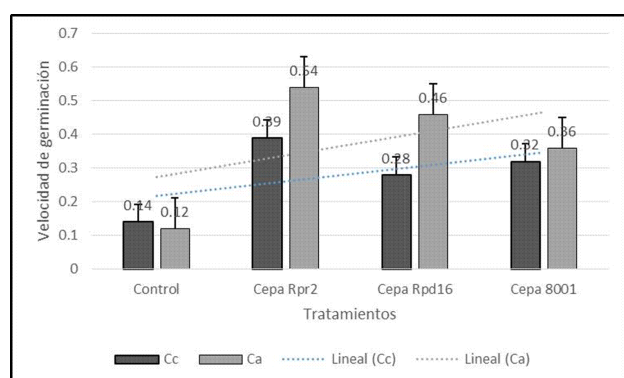


Figura 5. Velocidad de germinación en semillas de (*Coffea arabica* L.) y *Coffea canephora* en función de las inoculaciones con rizobios, en semillero evaluadas a los 66 días después de la siembra. Las barras indican el intervalo de confianza (Tukey $p < 0.05$).

Estas diferencias se expresan en la superioridad de los tratamientos T2, T3 y T14, que utilizaron las cepas Rpr2, Rpd16 y 8001, respectivamente, para ambos cultivares, en comparación con el control. El tratamiento control alcanzó el menor número de días para observar el fenómeno de germinación, mientras que los demás tratamientos mostraron diferencias estadísticamente significativas respecto a este. Esto sugiere una estrecha relación entre los valores porcentuales de germinación de las semillas y el tiempo empleado para lograrlo, ya que los tratamientos mencionados presentaron altos valores de germinación y un menor tiempo para que ocurriera este fenómeno.

Las sustancias hormonales emitidas por las diferentes cepas de esta bacteria promotora del crecimiento parecen tener un efecto limitado en el desarrollo del embrión en relación con el tiempo de aplicación (Bécquer et al., 2018). En general, esta variable (VG) refuerza la efectividad de los tratamientos que utilizan rizobios. Es evidente que los tratamientos inoculados con las cepas de rizobios mencionadas influyeron significativamente en dicha variable, posiblemente debido a una mayor actividad de ácido giberélico, el cual puede romper la latencia de las semillas (Mia et al., 2012).

Aunque las semillas de café no presentan latencia, muestran retraso en su crecimiento, germinación irregular y lenta tanto en condiciones de campo como de laboratorio. Los factores que dificultan la germinación pueden estar relacionados con los bajos niveles de sustancias promotoras de la germinación, como el ácido giberélico, en las semillas de café. Por otro lado, estas semillas contienen cantidades considerables de xantina y cafeína, compuestos que pueden tener un efecto alelopático (M. H. Oliveira et al., 2016), lo que provoca una autoinhibición de la germinación.

Los resultados indican que el mayor impacto de la inoculación con rizobios en este indicador se observó en los tratamientos que incluyeron la cepa Rpr2, la cual aumentó significativamente la velocidad de emergencia de las plántulas. Este hallazgo resalta la importancia de seleccionar cepas específicas de rizobios para optimizar los procesos de germinación en los cultivares de café.

Días al inicio de la germinación (DIG)

En *C. arabica*, los días a la germinación (DIG) mostraron una respuesta favorable en las semillas inoculadas con las tres cepas de manera individual, registrando valores de 24 días. En el caso de *C. canephora*, la cepa Rpr2 destacó con 23 días (Figura 6), lo que representó una reducción significativa en la fase de germinación en comparación con los 45 a 60 días informados por Coa et al. (2014). Cabe resaltar que todas las cepas superaron al control en ambos cultivares, lo que sugiere un efecto positivo de la inoculación en la aceleración del proceso de germinación.

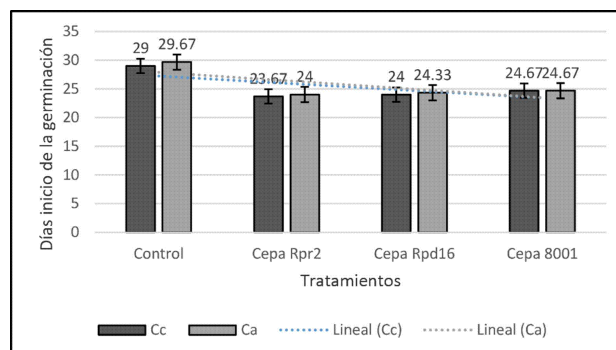


Figura 6. Días de inicio de germinación en semillas de *Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* en función de las inoculaciones con rizobios, en semillero evaluadas a los 66 días después de la siembra. Las barras indican el intervalo de confianza (Tukey $p < 0.05$).

Estos resultados son similares a los informados por Marquina et al. (2018) y Blanco et al. (2018), quienes observaron una aceleración en la germinación de *Capsicum annum* al utilizar cepas rizobiales, reduciendo el tiempo en un día respecto al control. Esta reducción en el tiempo de germinación podría traducirse en un menor período requerido para el establecimiento del semillero en condiciones

de invernadero. Esto implicaría una mayor eficiencia en la producción a corto plazo, lo que podría otorgar una ventaja competitiva en el mercado de producción de plántulas mediante el uso de estas rizobacterias.

Por otra parte, la síntesis de auxinas por parte de los rizobios ha sido ampliamente documentada (I. Hernández et al., 2015). El ácido indolacético (AIA) es una de las fitohormonas más importantes debido a su papel regulador en procesos como la división celular, la elongación y la diferenciación de las células. Estas características permiten asociar el efecto estimulador de las cepas de rizobios sobre los días de germinación de las semillas evaluadas con los niveles de AIA producidos por estas bacterias.

Además, la absorción de agua por la semilla desencadena una serie de cambios metabólicos, entre los que se incluyen la respiración, la síntesis de proteínas y la movilización de reservas. Simultáneamente, la división y el alargamiento celular en el embrión provocan la rotura de las cubiertas seminales, proceso que generalmente se manifiesta con la emergencia de la radícula fuera del pergamino (Coa et al., 2014). Esta etapa de germinación suele observarse en los primeros 45 días, por lo que el aporte de fitohormonas, como el AIA, representa un beneficio directo derivado de la actividad de estas bacterias.

Mia & Shamsuddin (2010) destacaron que la síntesis de auxinas por los rizobios está ampliamente demostrada. Por su parte, Machado et al. (2013) señalaron que entre las rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) con capacidad para producir AIA se encuentran *Rhizobium leguminosarum* y *Bradyrhizobium sp.* Otras fitohormonas, como las citocininas, también son producidas por las PGPR y favorecen la división y diferenciación celular. Un ejemplo de esto es *Rhizobium leguminosarum* en lechuga, lo que sugiere que en las cepas de rizobios más destacadas en este bioensayo podría existir una actividad significativa de estas fitohormonas.

Análisis económico

Según la metodología del análisis de presupuesto parcial propuesta por Evans (2014), se consideró que una plántula de café en fosforito genera un beneficio bruto de US\$ 0,2. Por otro lado, se calcularon los costos asociados a cada uno de los tratamientos correspondientes a una plántula en fosforito. La diferencia entre el beneficio bruto y los costos permitió determinar el beneficio neto de cada tratamiento (Tabla 3).

Al ordenar los beneficios netos de manera decreciente junto con sus costos, se realizó un análisis de dominancia. Un tratamiento se considera dominado cuando, a igual o menor beneficio neto, presenta un costo variable mayor. Este análisis reveló que el único tratamiento dominado fue el control (semillas sin inoculación), mientras que los demás tratamientos representaron las mejores alternativas económicas (Tabla 4).

Tabla 3. Beneficio bruto, costos y beneficio neto de los tratamientos en estudio para la fase de semillero.

	Tratamientos	Beneficio Bruto	Costo x semillas	Beneficio Neto
<i>C. canephora</i>	Control	0.2	0.0863	0.1137
	Rpr2	0.2	0.0717	0.1283
	Rpd16	0.2	0.0725	0.1275
	8001	0.2	0.0724	0.1276
<i>C. arabica</i>	Control	0.2	0.0737	0.1263
	Rpr2	0.2	0.0622	0.1378
	Rpd16	0.2	0.0652	0.1348
	8001	0.2	0.0643	0.1357

Tabla 4. Análisis de dominancia de los tratamientos en estudio, en semillero.

	Tratamientos	Beneficio Neto	Costo x semillas	Tratamientos Dominados
<i>C. canephora</i>	Rpr2	0.1283	0.0717	✓
	8001	0.1276	0.0724	✓
	Rpd16	0.1275	0.0725	✓
	Control	0.1137	0.0863	✓
<i>C. arabica</i>	Rpr2	0.1378	0.0622	✓
	8001	0.1357	0.0643	✓
	Rpd16	0.1348	0.0652	✓
	Control	0.1263	0.0737	✓

En términos generales, los resultados confirmaron la capacidad de los rizobios para estimular la germinación de las semillas de café. Este efecto podría ser aprovechado en los pregerminadores, que se utilizan anualmente para preparar grandes superficies de cultivo en el país. El cepario establecido en este estudio podría ser el punto de partida para abordar el problema planteado.

Análisis de los niveles de fertilidad de los sustratos y tejidos de las plántulas de café

Las características químicas del sustrato empleado antes del experimento, con un 100% de fósforo (P), mostraron un pH ácido (6.14), bajo contenido de materia orgánica (MO) y baja disponibilidad de P. Después del ensayo en el propagador, se observó un incremento en la MO, el pH y el fósforo en los tratamientos que incluyeron rizobios (desde el tratamiento 2 al 5), en comparación con el tratamiento que no contó con la cepa bacteriana en el fertilizante mineral (T1), el cual sirvió como testigo productivo (Tabla 5).

Tabla 5. Características químicas del sustrato usado en el vivero al final del experimento en la CPA “Camilo Cienfuegos”.

Sustratos	Niveles de P	pH (KCl)	P205 (mg/100 g)	K20 (mg/100 g)	MO (%)
Control Productivo	100% de PF	6.93	771.63	242.42	4.41
Rpr2	100% de PF	7.08	1149.32	368.3	6.3
Rpr2	75% de PF	7.01	1132.31	342.04	5.72
Rpr2	50% de PF	7.14	1281.65	384.07	5.92
Rpr2	25% de PF	6.83	520.09	131.74	6

MO: Materia orgánica (%), P: fósforo, P₂O₅ (mg 100 g): fósforo asimilable, K₂O (mg 100 g): potasio asimilable.

Es importante destacar que los tratamientos inoculados con la bacteria Rpr2 presentaron mayores concentraciones de P (final) en comparación con el P (inicial), mostrando diferencias significativas al 75% del nivel de fósforo respecto a los demás niveles y sus interacciones. En cuanto a los contenidos de fósforo en las raíces y hojas (P foliar), se observó que los tratamientos con valores más altos fueron aquellos inoculados con la cepa Rpr2 en combinación con 75% y 100% de P inorgánico. Por el contrario, el testigo productivo y los demás tratamientos registraron los valores más bajos (Tabla 6).

Tabla 6. Características químicas (P) de las muestras de suelo: antes y después de los tratamientos. CPA “Camilo Cienfuegos”, San Luis. 2020-2021.

No.	Tratamientos	P final sustrato mg 100g	P raíz (%)	P foliar (%)
T1	Control Productivo	80.41	0.16	0.19
T2	Rpr2-100%	910.58	0.20	0.21
T3	Rpr2-75%	1126.26	0.20	0.18
T4	Rpr2-50%	991.25	0.16	0.17
T5	Rpr2-25%	544.67	0.17	0.18

P: Fósforo.

Los resultados presentados en la Tabla 6 son consistentes con los informados por Cisneros et al. (2017), quienes observaron una respuesta positiva en los almácigos de café al adicionar bacterias solubilizadoras de fósforo (BSF) para suplir las necesidades nutricionales durante el desarrollo y crecimiento de la planta. Estos hallazgos no contradicen los obtenidos en estudios previos con aislamientos microbianos como *Kocuria* sp., *B. subtilis*, *S. diversispora* y *P. ochrochloron*, los cuales se adaptaron a la rizosfera de plántulas de café (*Coffea arabica*, variedad Castillo) y aumentaron la disponibilidad de fósforo en suelos

Typic Melanudand mezclados con pulpa de café. Además, se evidenció una mayor absorción de fósforo en el tejido vegetal, posiblemente debido a la mineralización de la pulpa en ausencia de roca fosfórica (Cisneros et al., 2017).

La inoculación microbiana ha demostrado mejorar la adquisición de fósforo y estimular el desarrollo de las plantas. Por ejemplo, Midekssa et al. (2015) observaron incrementos en el crecimiento y en el contenido de nitrógeno (N) y fósforo (P) en plantas de lentejas (*Lens culinaris*) biofertilizadas con cepas bacterianas aisladas de su rizosfera, en comparación con el control. Estos resultados respaldan la idea de que las BSF pueden optimizar la nutrición vegetal y promover un crecimiento más robusto en diversos cultivos.

Numerosos estudios han destacado los beneficios de las BSF en cultivos de importancia económica. Estrada et al. (2013) inocularon plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) con bacterias diazotróficas como *Herbaspirillum seropedicae*, *Burkholderia vietnamiensis*, *Gluconacetobacter diazotrophicus* y *Azotobacter chroococcum*, logrando un aumento del 47 % en la eficiencia de absorción de fósforo en comparación con plantas fertilizadas convencionalmente. De manera similar, Sánchez et al. (2012) informaron incrementos en el rendimiento de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) inoculadas con *Pseudomonas putida* PSO14 y *Enterobacter* sp. TVL-2, con mejoras que oscilaron entre el 17 % y el 49 % respecto al testigo químico.

(Leaungvutiviroj et al., 2010) observaron efectos positivos en el crecimiento de plantas de maíz (*Zea mays* L.) y col común (*Brassica oleracea* L.) al aplicar una cepa de *Burkholderia unamae* en combinación con *Bacillus subtilis*, *Azotobacter tropicalis* y una cepa productora de auxinas (KJB9). Los incrementos en el peso seco variaron entre 4,14 y 8,76 g por planta en maíz, y entre 11,1 y 40,8 g por planta en col común. Además, Oliveira et al. (2009) demostraron que las bacterias, *Bacillus* sp. B17 y *Burkholderia* sp. B5, asociadas a maíz, solubilizan fósforo en medios con fertilizantes tradicionales, movilizándolo entre el 58.5 % y el 67 % del fósforo total. Caballero et al. (2007) también informaron que cepas diazotróficas de *Burkholderia*, aisladas de la rizosfera y el rizoplano de tomate, poseen la capacidad de solubilizar fósforo mineral en ensayos *in vitro*. Estos estudios confirman que los géneros microbianos más frecuentemente involucrados en la solubilización de fosfatos son *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium*, *Enterobacter* y *Azospirillum*.

Las rizobacterias solubilizadoras de fosfatos emplean diversas vías para liberar fósforo a partir de compuestos inorgánicos u orgánicos. Entre estas vías se destaca la actividad de enzimas como fosfatasa no específicas, fitasas, fosfonatasas y C-P liasas, las cuales facilitan la solubilización de fósforo a partir de compuestos orgánicos en el suelo (Lugtenberg & Kamilova, 2009; Molina et al., 2015). Otro mecanismo ampliamente estudiado es la liberación de ácidos

orgánicos, como el ácido glucónico o 2-cetoglucónico, que quelan el fósforo biodisponible en el suelo mediante sus radicales hidroxilo y carboxilo (Ahemad & Kibret, 2014; Molina et al., 2015; Oteino et al., 2015).

Las rizobacterias solubilizadoras de fosfatos representan una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia de los fertilizantes fosfatados y aumentar la productividad agrícola. Estas bacterias proporcionan formas disponibles de fósforo a las plantas, lo que refuerza la importancia de trabajar con cepas autóctonas adaptadas a los ecosistemas en estudio (Khan et al., 2009). Además, se ha observado que el contenido de fósforo en las hojas de los almárgos de café, excepto en el testigo, se mantiene en niveles adecuados, lo que sugiere que las cepas de rizobios empleadas suplen eficientemente las necesidades nutricionales de las plántulas (Sadeghian, 2008).

El fósforo es un nutriente clave que limita la producción agrícola debido a su alta reactividad con la materia orgánica, los coloides del suelo y los cationes presentes en la solución del suelo (Martins et al., 2013). En cultivos como el café, el fósforo es crucial durante las primeras fases de desarrollo, ya que promueve un sistema radicular más robusto (Cisneros et al., 2017). Los tratamientos nutricionales basados en fósforo han demostrado mejoras significativas en la calidad de cultivos como pepinillo (Dutra et al., 2014), soja (Queiroz et al., 2020), maracuyá amarillo (Silva et al., 2017), plantas adultas de café (Santinato et al., 2014) y semillas de café arábica (Rosado, 2019).

El fósforo desempeña un papel fundamental en el metabolismo vegetal, ya que forma parte de compuestos esenciales como los fósforo-azúcares, que participan en la fotosíntesis, la respiración y otros procesos metabólicos (Resende et al., 2011; Taiz et al., 2017). Además, este elemento es crucial en el metabolismo energético, al estar presente en moléculas como ADP, ATP, AMP y pirofosfato (Salisbury & Ross, 1992). Su amplia presencia en las plantas refleja su importancia y su disponibilidad a través del suelo, las hojas o las semillas.

El potencial de las bacterias solubilizadoras de fósforo como alternativa a la fertilización tradicional ha sido ampliamente documentado. Estrada et al. (2013) demostraron que su aplicación como inoculantes en semillas o suelo puede mejorar la disponibilidad de fósforo para los cultivos, siempre que existan fuentes de fósforo inorgánico (Pi) y orgánico (Po) en el suelo. Este enfoque representa una estrategia sostenible para optimizar la nutrición vegetal y reducir la dependencia de fertilizantes químicos.

Efecto de la bacteria seleccionada en el crecimiento y desarrollo de plántulas de café

En cuanto a la altura de las plantas, se observó un aumento constante a lo largo del tiempo. Los tratamientos más destacados fueron aquellos inoculados con la cepa Rpr2 a niveles del 75 % y 100 % de fósforo ($p < 0.05$) (Tabla 7).

Al comparar los injertos inoculados con Rpr2 al 75 % de fósforo con el control productivo, se encontró que los primeros fueron un 28 % más altos que los no inoculados ($p < 0.05$). Por otro lado, la menor altura se registró en el tratamiento con 25 % de fósforo, donde las plantas fueron un 13 % más bajas que aquellas con 75 % de fósforo.

Tabla 7. Altura de planta en cada momento de evaluación del ensayo con *Coffea arabica* injertada sobre *Coffea canephora* y rizobios.

Tratamientos		Altura de Planta (cm)				
		1ra	2da	3ra	4ta	5ta
Niveles de P						
100 %	Control Productivo	5.97 c	7.15 c	8.62 c	9.30 c	13.24 c
100 %	Rpr2	8.02 a	9.06 b	13.14 a	13.15 a	16.38 a
75 %	Rpr2	7.82 a	9.97 a	12.13 a	14.57 a	17.03 a
50 %	Rpr2	7.82 a	8.62 b	10.42 b	12.38 a	15.03 b
25 %	Rpr2	6.69 b	7.99 c	10.39 b	11.93 b	14.93 b
	EE	0.27	0.40	0.54	0.63	0.7

P: fósforo, EE: error estándar. Medias con letras iguales no difieren significativamente para el test Tukey a $p < 0.05$. Fuente: Resultados de la investigación.

La altura de las plántulas de café en la fase de vivero fue significativamente influenciada por las cepas de rizobios en los cinco momentos de evaluación. Las cepas empleadas favorecieron la disponibilidad de fósforo, lo que estimuló el desarrollo de las plantas. En contraste, el testigo absoluto mostró las plantas más pequeñas y menos desarrolladas, lo que resalta la importancia de la inoculación con rizobacterias para optimizar el crecimiento en etapas tempranas.

El efecto observado podría estar relacionado con el papel favorable de las auxinas, las cuales, en concentraciones adecuadas y de forma activa, dependen de su síntesis, aplicación, transporte, degradación y compartimentación. Estos procesos influyen directamente en la formación de pelos radicales y en el número y elongación de raíces laterales, lo que facilita la absorción de agua y nutrientes por la planta. Además, promueven un mayor intercambio con el medio ambiente de la rizosfera (Rahman et al., 2002).

Se plantea que las auxinas ejercen una acción positiva sobre los procesos relacionados con el sistema radical, lo que reduce la presión de la pared celular e induce la síntesis de enzimas específicas. Esto conlleva a un aumento en la plasticidad de la pared celular, lo que favorece el crecimiento y desarrollo de las raíces.

Este comportamiento se asocia con la respuesta a la bioestimulación, la cual ha sido informada en otros cultivares de café al utilizar microorganismos rizosféricos o productos derivados de estos en la obtención de posturas. Por ejemplo,

se ha documentado el uso de *Azotobacter* en clones de *Coffea canephora*, donde se obtuvieron resultados favorables en la fase de vivero (Bustamante et al., 2010). De manera similar, al emplear el bioestimulante *Azotobacter chroococcum* en posturas de *Coffea arabica* L., se observó un mejor comportamiento cuando la aplicación se realizó en el momento del trasplante y en la aparición del primer par de hojas.

Asimismo, al utilizar un biopreparado de origen bacteriano a partir de *Burkholderia cepacia* durante las fases de crecimiento y desarrollo de plántulas de *Coffea canephora* P. cv. Robusta, se obtuvieron resultados favorables en la altura de la planta (González et al., 2011). De igual modo, se han informado respuestas positivas en cultivos como arroz (*Oryza sativa*) y maíz (*Zea mays*) al emplear bioproductos obtenidos a partir de otras especies de bacterias estimulantes del crecimiento vegetal (A. Hernández et al., 2010; Pedraza et al., 2010).

Diámetro del Tallo (DT)

Los resultados de la reinoculación de la cepa de rizobios seleccionada, aplicada durante el trasplante, mostraron valores que no difirieron significativamente del control en la variable DT durante los primeros cinco meses para los cuatro niveles de fósforo estudiados. Sin embargo, esta aplicación indujo un mayor diámetro del tallo en las plantas injertadas en comparación con el control (Tabla 8).

Tabla 8. Diámetro de tallo en cada momento de evaluación en el experimento con *Coffea arabica* injertada sobre *Coffea Canephora*, 4 niveles de fósforo y rizobios.

Tratamientos	Niveles de P	Diámetro de tallo (mm)					
		1ra	2da	3ra	4ta	5ta	
	100 %	Control Productivo	1.52 a	1.59 a	1.76 a	2.07 b	2.28 b
	100 %	Rpr2	1.65 a	1.67 a	2.03 a	2.35 a	2.79 a
	75 %	Rpr2	1.54 a	1.88 a	2.07 a	2.64 a	3.09 a
	50 %	Rpr2	1.46 b	1.7 a	1.85 a	2.29 b	3.08 a
	25 %	Rpr2	1.31 b	1.59 a	1.80 a	2.28 b	2.43 b
		EE	0.06	0.07	0.09	0.11	0.16

P: fósforo, E E: Error estándar. En la misma columna, letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey $p < 0.05$). Fuente: Resultados de la investigación

Los resultados indican que las inoculaciones de rizobios tuvieron un efecto significativo sobre el desarrollo de las plántulas de café tratadas, observándose diferencias significativas con respecto al control en la variable DT durante la cuarta y quinta evaluación (180 y 210 días después del trasplante). Este hallazgo corrobora los resultados presentados por González et al. (2015) al evaluar el DT en el desarrollo de plántulas de *Coffea arabica* L. cv. “Caturra rojo”

a los siete meses de cultivo con la aplicación de Bioenraiz®. No obstante, los valores de DT registrados en esta investigación fueron superiores.

Número de hojas

Los resultados demuestran que las inoculaciones con la cepa de rizobios tuvieron un efecto significativo sobre el desarrollo de las plántulas injertadas de café, observándose diferencias significativas con respecto al control en la variable número de pares de hojas en todos los momentos evaluados (Tabla 9).

Tabla 9. Número de hojas en cada momento de evaluación del desarrollo de injertos de café.

Tratamientos	Niveles de P	Diámetro de tallo (mm)					
		1ra	2da	3ra	4ta	5ta	
	100 %	Control Productivo	2.4 b	2.7 b	3.6 b	4.1 c	4.3 c
	100 %	Rpr2	4.0 a	4.4 a	5.0 a	5.33 a	6.0 b
	75 %	Rpr2	4.3 a	4.6 a	5.5 a	6.5 a	7.0 a
	50 %	Rpr2	2.8 b	3.4 b	4.8 a	5.33 a	5.8 b
	25 %	Rpr2	2.7 b	3.2 b	4.3 a	4.83 b	5.2 b
		EE	0.3	0.38	0.43	0.51	0.57

P: Fósforo, E E: Error estándar. En la misma columna, letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey $p < 0.05$).

El tratamiento con la cepa Rpr2 resultó efectivo en el incremento del número de hojas a los siete meses. En la figura 7 se observa el estado favorable de las plántulas procedentes de semillas y posturas tratadas con la cepa Rpr2, las cuales se caracterizaron por presentar un vigor adecuado y hojas de coloración verde brillante.



Figura 7. Número de hojas de las plántulas de *Coffea arabica* L. cv. “Isla 5-15” injertada sobre *Coffea canephora* cv. “Robusta”, inoculada con la cepa Rpr2. Fuente: Autor.

Al emplear cepas bacterianas del género *Rhizobium* durante las fases de crecimiento y desarrollo de plántulas injertadas de *C. arabica* Isla 5-15 sobre *C. canephora* cv. Robusta para los cuatro niveles de fósforo, se obtuvieron resultados favorables en el número de pares de hojas (Tabla 9).

Se observó que a los 210 días de la siembra, los tratamientos con presencia de las cepas de rizobios fueron superiores al control, sin diferencias estadísticas entre ellas, excepto la cepa Rpr2 al 75% de fósforo, que favoreció significativamente la emisión de pares de hojas en comparación con todos los tratamientos.

Este último efecto podría explicarse por el principal atributo de la cepa Rpr2, que es positiva para oxidasa y gelatinasa (Pérez et al., 2019), una característica que la diferencia de las otras cepas. Aunque no existe literatura abundante sobre el efecto de los rizobios en esta variable en el café, Mazher et al. (2014) encontraron que la aplicación de varios biofertilizantes comerciales basados en rizobios y otras bacterias estimuladoras del crecimiento vegetal influyó favorablemente en el número de hojas por planta en *Moringa*, en comparación con el control no inoculado.

Longitud de la raíz (LR)

Al analizar la efectividad de la cepa rizobial en la variable de crecimiento evaluada, se comprobó que las posturas presentaban un nivel adecuado de crecimiento. Los valores superaron los beneficios en la longitud de la raíz al compararlas con las posturas no inoculadas.

Los resultados mostraron que las posturas reinoculadas con la cepa Rpr2 presentaron un crecimiento de la raíz de mayor tamaño, lo que resultó significativo en relación con los demás tratamientos. Destacó que para los niveles de 75 y 100% de fósforo, los valores superaron al tratamiento control.

De igual forma, en la figura 8 se observa que la cepa Rpr2 ejerció un efecto benéfico al superar al control con un 16 y 14% de crecimiento radicular en los niveles de 75 y 100% de fósforo empleados en el sustrato.

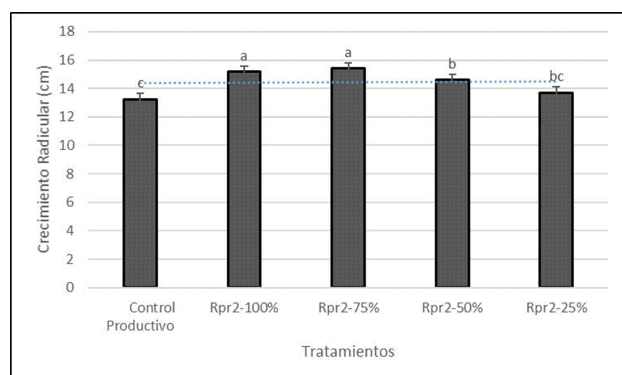


Figura 8. Longitud de la raíz de *Coffea arabica* L. injertada sobre *Coffea canephora* en función de las inoculaciones con rizobios, a los 210 días después de la siembra en cuatro niveles de fósforo (25, 50, 75 y 100%). Las barras indican el intervalo de confianza (Tukey $p < 0.05$).

Estos hallazgos se comparan con la investigación realizada por (Adriano et al., 2011), quienes informaron incrementos en la longitud de la raíz entre el 14,7 % y el 18,2 %

en plantas inoculadas con *Azotobacter* y *Glomus*, en comparación con las raíces de las plantas de café testigo. Por lo tanto, se puede inferir que las rizobacterias empleadas mejoraron la disponibilidad de fósforo, promovieron el crecimiento vegetal, ayudaron a la descomposición de materia orgánica y aceleraron el proceso de compostaje.

En el proceso de establecimiento de relaciones con rizobacterias, las plantas invierten hasta el 20 % de las fuentes de carbono obtenidas durante la fotosíntesis. Esto se traduce en una mejora en la arquitectura de la raíz, la absorción de nutrientes y la estimulación del sistema inmune de la planta, llevados a cabo por las PGPR. Un ejemplo destacado de estos beneficios se encuentra en la bacteria *Rhizobium* (Stringlis et al., 2018).

Las diferencias entre las cepas podrían estar relacionadas con los mecanismos de atracción de la bacteria hacia la rizosfera de su hospedero, los cuales están mediados por una quimiotaxis específica hacia exudados vegetales particulares. Además, una buena adhesión y colonización en la superficie de la raíz son factores que pueden influir en la funcionalidad de la simbiosis asociativa (Molina et al., 2015).

Área foliar (AF)

En esta investigación, también se evaluó el efecto de la rizobacteria en el crecimiento y desarrollo de la planta, representado en las hojas. El análisis de varianza de los datos del área foliar mostró diferencias significativas entre algunos tratamientos.

Los resultados indican que los tratamientos inoculados con las rizobacterias Rpr2 presentaron los valores más altos de área foliar, con un incremento del 48 % para el nivel de fósforo del 75 %. Por otro lado, el control productivo fue el menos desarrollado, con valores significativamente menores para el 75 % del nivel de fósforo, como se aprecia en las Figuras 9 y 10.

Este parámetro es importante porque el área foliar de las posturas se relaciona directamente con la superficie fotosintética útil de la planta. En el caso del testigo,

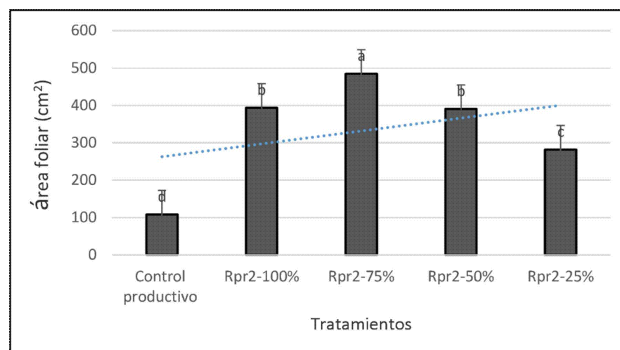


Figura 9. Área foliar de *Coffea arabica* L. injertada sobre *Coffea canephora* en función de las inoculaciones con rizobios, a los 210 días después de la siembra en cuatro niveles de fósforo (25, 50, 75 y 100%). Las barras indican el intervalo de confianza (Tukey $p < 0.05$).

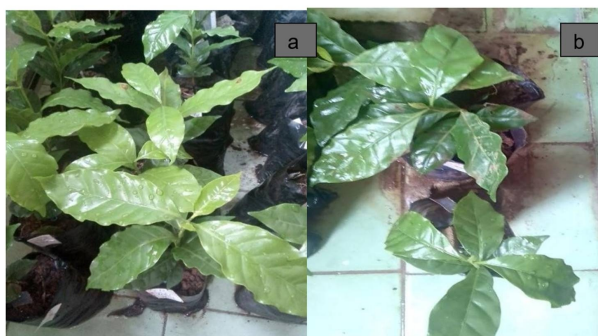


Figura 10. Plántulas de *Coffea arabica* L.cv. “Isla 5-15” injertada sobre *Coffea canephora* cv “Robusta”, a) inoculada con la cepa Rpr2 y b) control. Fuente: Resultados de la investigación.

se observó que, a pesar de presentar un buen número de hojas por planta, estas eran demasiado pequeñas en comparación con las de los demás tratamientos, lo cual se reflejó en los resultados de área foliar.

Cisneros et al. (2017), en su investigación sobre la influencia de microorganismos en la disponibilidad de fósforo en *Coffea arabica* variedad Castillo, encontraron que los aislamientos microbianos solubilizadores de fosfatos, como *Kocuria* sp., *B. subtilis*, *S. diversispora* y *P. ochrochloron*, presentaron diferencias significativas en la respuesta del área foliar como variable de desarrollo, con un 58 % de diferencia respecto al testigo absoluto.

La promoción del crecimiento y desarrollo vegetal está relacionada con la capacidad de cada microorganismo para producir sustancias químicas, como fitohormonas (ácido indolacético, citocianinas, giberelinas y etileno, entre otras) (Ibarra et al., 2014). Además, el mayor incremento en el número de hojas de las plantas inoculadas se atribuye a un aumento en la capacidad de absorción de nutrientes a través del sistema radical, inducido por los microorganismos.

Biomasa fresca (MF)

En cuanto al contenido de masa fresca de los órganos de las posturas de café, se observó un beneficio al tratarlas con la cepa de rizobio en estudio durante la segunda fase de la investigación, obteniéndose diferencias significativas entre los tratamientos. Los menores valores se presentaron en el tratamiento control.

La biomasa fresca de diferentes partes de la planta fue cuantificada (Tabla 10). La masa fresca de la raíz fue superior con la reinoculación de la cepa Rpr2 al 75 % del nivel de fósforo en el sustrato, mostrando un 13 % más de peso en comparación con las posturas sin reinocular (control).

En cuanto a la masa fresca de la parte aérea, las plantas con mayor masa fueron las que se sembraron con el nivel de 75 % de fósforo y tratadas con la cepa Rpr2, superando en un 43 % al control. A los niveles de fósforo del 25 y 50 %, se observó un efecto positivo de la cepa bacteriana, aunque con valores menores, pero siempre superiores al control en los distintos órganos evaluados.

Tabla 10. Masa fresca de los diferentes órganos de las plantas de café durante el experimento con rizobios.

Niveles de P	Tratamientos	Masa fresca (g)			
		MF-R	MF-T	MF-H	MF-PA
100%	Control Productivo	1.36 d	0.15 d	1.07 d	1.79 e
100%	Rpr2	2.30 b	0.89 a	2.78 b	3.65 b
75%	Rpr2	2.90 a	0.81 a	3.45 a	4.35 a
50%	Rpr2	1.77 c	0.94 a	2.68 b	3.23 c
25%	Rpr2	1.16 e	0.74 b	1.95 c	3.11 c
	EE	0.12	0.06	0.16	0.18

P: Fósforo, E E: Error estándar. En la misma columna, letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey $p < 0.05$). Fuente: Resultados de la investigación.

Beltrame (2020) señalaron que la pérdida de peso en las plantas se produce porque aquellas con un alto nivel de nutrientes en sus tejidos desarrollan mecanismos que generan una reducción de la masa, incluso afectando la actividad de las rizobacterias en las raíces. Este gasto energético no muestra un retorno significativo en el crecimiento.

Se sugiere que las inoculaciones con las cepas de rizobios proporcionaron los mejores resultados en todos los parámetros evaluados. Estos efectos podrían resultar de la producción de exopolisacáridos y biopelículas, que influyen en el suministro de agua. Una amplia variedad de rizobacterias poseen la capacidad de liberar exopolisacáridos (EPS) y formar biopelículas en la raíz (A. F. Mohammed, 2018).

Las comunidades de rizobacterias forman estructuras complejas de células microbianas que se adhieren a la superficie de la raíz, rodeadas por una matriz polimérica extracelular (biopelículas) (Gupta et al., 2017). Estas biopelículas protegen significativamente a las plantas del estrés externo, mejoran la adherencia a las superficies, el estado de agregación del suelo de la rizosfera y aumentan la disponibilidad de agua y nutrientes, lo que favorece el crecimiento de la planta (Kasim et al., 2016; A. F. Mohammed, 2018).

Además, los exopolisacáridos de las rizobacterias funcionan como moléculas señal que activan la respuesta de defensa durante la infección por patógenos. Algunos EPS se unen a cationes, como el Na^+ , lo que sugiere un papel en la mitigación del estrés por salinidad al reducir el contenido de Na^+ disponible para las plantas (Gupta et al., 2017).

Algunas PGPR, como *Rhizobium leguminosarum*, *Azotobacter vinelandii*, *Bacillus drentensis*, *Enterobacter cloacae*, *Agrobacterium* sp., *Xanthomonas* sp. y *Rhizobium* sp., liberan exopolisacáridos (Gouda et al., 2018). La aplicación de PGPR productoras de EPS representa una medida prometedora para combatir el estrés por sequía y salinidad, contribuyendo así a la seguridad alimentaria mundial (Naseem et al., 2018).

Biomasa seca (MS) e índices de calidad

La utilización de la cepa bacteriana identificada como rizobio (Rpr2) repercutió favorablemente en el incremento de la biomasa seca (Tabla 11), en la relación entre los órganos y en los índices de esbeltez y calidad de las plantas (Tabla 12). Los valores obtenidos para estos indicadores superaron al control fertilizado.

Tabla 11. Masa. seca de los diferentes órganos de las plantas de café durante el experimento con rizobios.

Tratamientos Niveles de P		Masa seca (g)			
		MF-R	MF-T	MF-H	MF-PA
100%	Control Productivo	0.14 e	0.21 d	0.12 d	0.33 e
100%	Rpr2	1.15 b	0.70 a	1.10 b	1.8 b
75%	Rpr2	1.53 a	0.76 a	1.50 a	2.26 a
50%	Rpr2	0.69 c	0.55 b	0.94 c	1.49
25%	Rpr2	0.64 d	0.45 c	0.44 c	0.89 d
	EE	0.06	0.04	0.07	0.09

PS-R: Peso seco de la raíz, PS-T: Peso seco del tallo, PS-H: Peso seco de las hojas, PS-A: Peso seco de la parte aérea, EE: Error estándar. En la misma columna, letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey $p < 0.05$). Fuente: Resultados de la investigación.

Tabla 12. Índices estudiados durante el experimento con rizobios.

Tratamientos Niveles de P		Índices (g)		
		A/R	IE	ICD
100%	Control Productivo	2.35 a	2.33 e	1.05 c
100%	Rpr2	1.57 b	5.44 b	2.48 b
75%	Rpr2	1.48 b	4.53 c	3.20 a
50%	Rpr2	2.16 a	3.43 a	2.22 b
25%	Rpr2	1.39 b	3.36 d	1.74 c
	EE	0.23	0.08	0.13

A/R: Relación parte peso seco de la parte aérea y la raíz, IE: Índice de esbeltez, ICD: Índice de Calidad de Dickson, P: Fósforo, EE: Error estándar. En la misma columna, letras diferentes indican diferencia estadística (Tukey $p < 0.05$). Fuente: Resultados de la investigación.

Al analizar la materia seca, se observó que los valores más altos se obtuvieron en el tratamiento con la cepa Rpr2, seguido del tratamiento 8001, con diferencias significativas entre ellos en los cuatro niveles de fósforo y superando al control absoluto, donde se presentaron los menores valores.

Los mayores incrementos se obtuvieron en los tratamientos donde se inoculó la cepa Rpr2 en interacción con el 75 % de fósforo en el sustrato, superiores incluso a los alcanzados por los tratamientos al 25, 50, 100 % y control.

Un comportamiento similar se observó al evaluar los índices de eficiencia para las plántulas de café con la inoculación de la cepa de rizobio en comparación con los tratamientos sin aplicación (Tabla 12). Los incrementos alcanzaron valores de hasta 1.39 %. En este caso, los tratamientos Rpr2 al nivel del 75 % superaron los alcanzados en los tratamientos controles para sus respectivas proporciones de materia orgánica en los sustratos, aunque la diferencia fue mínima.

La producción de materia seca permite evaluar el crecimiento de una planta. La cantidad total de materia seca acumulada refleja directamente la producción fotosintética líquida, sumada a la absorción de nutrientes minerales (Aguilar et al., 2016). Sin embargo, al evaluar la masa seca aérea, radicular y total de la planta, no se observaron diferencias estadísticas entre las medias obtenidas de las cepas en ninguno de los cuatro niveles de fósforo. En general, las inoculaciones de las cepas bacterianas tienden a incrementar la producción de masa seca en las plantas cuando el sustrato contiene entre el 75 % y el 100 % del nivel de fósforo.

La relación de biomasa raíz-parte aérea parece estar regulada por un equilibrio entre la absorción de agua por las raíces y la fotosíntesis en la parte aérea. Esto implica que los productos fotosintéticos no utilizados para el crecimiento foliar se acumulan en las extremidades de las raíces, las cuales crecen en busca de agua (Encalada, 2017). Según estos autores, la raíz mantiene su velocidad de crecimiento, mientras que la parte aérea la reduce.

El cociente de esbeltez se considera un índice de calidad de la planta que ayuda a identificar posibles ahijamientos, es decir, un crecimiento excesivo en altura en comparación con el diámetro. Este parámetro ha sido utilizado para evaluar la calidad de plántulas en diversos cultivos. Según Parrales (2018), el cociente de esbeltez es uno de los factores más influyentes en la calidad de la planta de *Pinus tropicalis* durante su etapa inicial de desarrollo en vivero. Otros autores, como Vargas et al. (2016), también destacan la importancia de este índice en cultivos como el café. Aunque no se ha empleado ampliamente para medir la calidad de posturas de cafetos, su aplicación podría ser útil para evaluar la calidad de las plántulas producidas.

En este estudio, el índice de esbeltez mostró mayor esbeltez y vigor en las plántulas inoculadas con la cepa Rpr2, especialmente en el nivel de 75 % de fósforo. Esto sugiere que este tratamiento podría mejorar la supervivencia tras el trasplante y favorecer un mejor desarrollo en campo. El índice de esbeltez aumentó gradualmente en comparación con el control, obteniéndose los mejores resultados en el nivel de fósforo mencionado.

Encalada (2017), en un estudio sobre aplicaciones de ácido salicílico y nutrición mineral en plántulas de chile habanero, informaron que el cociente de esbeltez varió entre 2,92 para el tratamiento T2 (AS) y 4,64 para el tratamiento T4 (F+AS).

Los tratamientos T3 y T4 mostraron mayor esbeltez y vigor en las plántulas. En este trabajo, la media de los datos de este parámetro fue de 6,70, un valor significativamente superior al informado por estos autores.

Considerando estos indicadores de manera integral, el índice de calidad de Dickson (ICD) fue el parámetro utilizado para determinar el mejor tratamiento, ya que combina los indicadores previamente analizados. En este sentido, el mejor ICD correspondió a las posturas que crecieron con la presencia de la cepa Rpr2. Por el contrario, el índice más bajo se observó en las posturas sin rizobios (Tabla 12), aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre todos los tratamientos para esta variable. Muñoz et al. (2015) indicaron que los índices de calidad más altos representan un mayor equilibrio entre los componentes de la planta, lo que se traduce en una mejor calidad.

Un índice de calidad de Dickson alto refleja una adecuada relación entre la altura y el diámetro del tallo, así como una buena proporción entre la parte aérea y la parte radical. Esto asegura un comportamiento en campo con alto potencial de crecimiento radical y una elevada capacidad de intercambio gaseoso. Encalada (2017) señalaron que una postura de café con un índice superior a 0,20 en la escala de Dickson tendría las características mínimas para continuar su crecimiento en condiciones de campo sin complicaciones.

Por lo anterior, la inoculación de rizobios podría contribuir a la obtención de material de plantación de café de óptima calidad de manera rentable. Esta práctica reduce significativamente el uso de productos químicos, lo que favorece el ahorro de recursos, la mejora de los suelos y el cuidado del medio ambiente. Por tanto, esta técnica representa una alternativa factible para incluir en el manejo integrado del cultivo del café.

Destaca el inoculante Rpr2, que demostró ser más efectivo en todas las variables evaluadas. Este aislado se caracterizó por adherirse estrechamente a las células epidérmicas de la raíz (I. Hernández & Nápoles, 2017), lo que sugiere que mantuvo una relación más estrecha con la superficie radical del café.

Los resultados obtenidos indican que es posible obtener plántulas de café con un vigor y calidad adecuados para resistir el trasplante a campo después de la inoculación con rizobios. Este manejo del cultivo del café no solo es adecuado, sino que también tiene un gran valor desde el punto de vista sustentable, debido a la reducción en el uso de insumos químicos para estimular el desarrollo de las posturas.

Análisis económico

Según la metodología del análisis de presupuesto parcial según Evans (2014), se consideró que una planta de café a los tres meses genera un beneficio bruto de US\$ 0,64. Por otro lado, se calcularon los costos de cada uno de los tratamientos correspondientes a una planta de siete meses

en vivero. La diferencia entre el beneficio bruto y los costos permitió determinar el beneficio neto de cada tratamiento (Tabla 13).

Tabla 13. Beneficio bruto, costo y beneficio neto para los tratamientos en estudio de vivero. Finca La Carlota, Armenia, Nanegalito, Pichincha, 2018.

Tratamientos		Beneficio Bruto	Costo de planta sembrada	Beneficio neto
Niveles de P				
100%	Control Productivo	0.64	0.8234	-0.1834
100%	Rpr2	0.64	0.3135	0.3265
75%	Rpr2	0.64	0.3109	0.3291
50%	Rpr2	0.64	0.4511	0.1889
25%	Rpr2	0.64	0.4929	0.1471

Se realizó un análisis de dominancia ordenando el beneficio neto en forma decreciente junto con sus costos correspondientes. En este análisis, un tratamiento se considera dominado cuando, con un beneficio neto igual o menor, presenta un costo variable más alto. Como resultado, se identificaron varios tratamientos no dominados, lo que hizo necesario llevar a cabo un análisis marginal. De este proceso, se determinó que la inoculación con la cepa Rpr2 al 75 % de fósforo constituye la mejor alternativa económica (Tabla 14).

Tabla 14. Análisis de dominancia de los tratamientos en estudio, en vivero. Finca La Carlota, Armenia, Nanegalito, Pichincha, 2018.

Tratamientos		Beneficio Neto	Costo de planta sembrada	Tratamientos Dominados
Niveles de P				
100%	Control Productivo	-0.1834	0.8234	
100%	Rpr2	0.3265	0.3135	
75%	Rpr2	0.3291	0.3109	✓
50%	Rpr2	0.1889	0.4511	✓
25%	Rpr2	0.1471	0.4929	✓

Los diferentes géneros bacterianos son componentes esenciales de los suelos. Estas bacterias participan en diversas actividades bióticas que contribuyen a la dinámica y sostenibilidad del ecosistema del suelo, favoreciendo la producción de cultivos (Cray et al., 2016). Además, estimulan el crecimiento de las plantas al movilizar nutrientes en el suelo. Entre ellas, las rizobacterias, que se encuentran en la zona radicular de las plantas, destacan por su capacidad para transformar, movilizar y solubilizar nutrientes

(Velasco et al., 2020). Por lo tanto, las rizobacterias desempeñan un papel dominante en el reciclaje de nutrientes del suelo, lo que las convierte en un factor crucial para mantener su fertilidad (Odoh, 2017). Su aplicación en sistemas productivos representa una alternativa viable para reducir los costos de producción y minimizar el impacto ambiental asociado con el uso de fertilizantes químicos (Coa et al., 2014).

El encarecimiento de los fertilizantes químicos, la escasez de reservas naturales de ciertos nutrientes y el alto consumo energético requerido para su fabricación han impulsado la adopción de alternativas biológicas. Estas no solo se presentan como una necesidad en la producción agrícola actual, sino también como un componente fundamental de la agricultura científica del futuro. Su implementación permite mantener un equilibrio ecológico y ofrece una opción económicamente factible (Barroso et al., 2015).

Viñals et al. (2017) informaron que la aplicación de productos bioactivos genera un efecto beneficioso en la nutrición de los cafetos durante su fase de vivero. Este efecto se refleja en el crecimiento de las plántulas, observándose los mejores resultados con el uso de FitoMas-E. Además, esta práctica contribuye a un importante ahorro de recursos financieros y reduce la cantidad de material orgánico necesario en los sustratos.

CONCLUSIONES

1. La inoculación con cepas de rizobios (Rpr2, Rpr16 y 8001) incrementa significativamente los porcentajes de germinación y emergencia en *Coffea canephora* y *Coffea arabica*, superando los controles no inoculados en todas las etapas evaluadas (30, 40 y 50 días).
2. Las cepas de rizobios, especialmente Rpr2, reducen los días al inicio de la germinación (DIG) en ambos cultivares, mostrando una germinación más temprana (23-24 días) en comparación con los controles (45-60 días).
3. Las plántulas inoculadas con rizobios presentan mayor altura, diámetro del tallo, número de hojas y longitud de raíces, destacándose la cepa Rpr2 al 75 % de fósforo, que mostró los mejores resultados en biomasa fresca y seca.
4. Los índices de calidad, como el índice de esbeltez y el índice de calidad de Dickson, son superiores en las plántulas inoculadas con rizobios, indicando un mejor equilibrio entre la parte aérea y radical, lo que sugiere una mayor adaptabilidad al trasplante.
5. La inoculación con rizobios, especialmente Rpr2 al 75 % de fósforo, es la alternativa más rentable, con mayores beneficios netos y menores costos en comparación con los controles no inoculados, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Adriano, M. de L., Jarquín Gálvez, R., Hernández Ramos, C., Figueroa, M. S., & Monreal Vargas, C. T. (2011). Biofertilización de café orgánico en etapa de vivero en Chiapas, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(3), 417-431.
- Aguilar, C. E., Alvarado Cruz, I., Martínez Aguilar, F. B., Galdámez, J. G., Gutiérrez Martínez, A., & Morales Cabrera, J. A. (2016). Evaluación de tres abonos orgánicos en el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en etapa de vivero. *Siembra*, 3(1), 11-20.
- Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King saud University-science*, 26(1), 1-20.
- Alcarraz, M., Heredia Jiménez, V., & Julian Ibarra, J. P. (2019). Cepas bacterianas nativas con actividades promotoras del crecimiento vegetal aisladas de la rizosfera de *Coffea* spp. En Pichanaqui, Perú. *Biotecnología Vegetal*, 19(4), 285-295.
- ANACAFE. (2017). *Evaluación de tres nematocidas y la práctica de injerto hipocotiledonar en el control de Pratylenchus sp.* Asociación Nacional de Café. <https://agritrop.cirad.fr/387395>
- Barraza, F., Benavides, O., & Torres, F. (2016). Calidad fisiológica y energía de germinación de semillas de balsamina (*Momordica charantia* L.). *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(1), 43-52.
- Barroso, L., Abad Michel, M., Rodríguez Hernández, P., & Jerez Mompíe, E. (2015). Aplicación de FitoMas-E y EcoMic® para la reducción del consumo de fertilizante mineral en la producción de posturas de café. *Cultivos Tropicales*, 36(4), 158-167.
- Bécquer, C. J., Cancio, T., Nápoles, J. A., Muir, I., Ávila, U., Álvarez, O., & Madrigal, Y. (2018). Selección de rizobios por su efecto en la germinación y desarrollo incipiente de *Moringa oleífera* Lam. Fase I: Condiciones controladas. *Cuban Journal of Agricultural Science*, 52(4), 473-484.
- Beltrame, I. (2020). Emergência e desenvolvimento inicial de mudas de café conilon submetidas a adubação fosfatada. *Ifes ciencias*, 6(3), 59-67. <https://doi.org/10.36524/ric.v6i3.866>
- Blanco, E. L., Castro, Y., Olivo, A., Skwierinski, R., & Barrios, F. M. (2018). Germinación y crecimiento de plántulas de pimentón y lechuga inoculadas con rizobios e identificación molecular de las cepas. *Bioagro*, 30(3), 207-218.
- Bustamante, C. A., Rodríguez, M. I., & Pérez, A. (2010). Respuesta de clones de *Coffea canephora* a la aplicación de *Azotobacter* en fase de vivero. *Café Cacao*, 9(1), 8-13.
- Caballero, J., Onofre-Lemus, J., Estrada-de Los Santos, P., & Martínez-Aguilar, L. (2007). The Tomato Rhizosphere, an Environment Rich in Nitrogen-Fixing

- Burkholderia* Species with Capabilities of Interest for Agriculture and Bioremediation. *Applied and Environmental Microbiology*, 73(16), 5308-5319. <https://doi.org/10.1128/AEM.00324-07>
- Cantos, G., Pinargote Choéz, J., & Palma Ponce, R. (2018). Influencia de la fitohormona kinetina en el crecimiento de plántulas de *Coffea arabica* L. injertadas sobre patrón robusta en vivero. *Revista cubana de ciencias forestales*, 6(2), 134-145.
- Cisneros, C. A., Sánchez-de Prager, M., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Efecto de bacterias solubilizadoras de fosfatos sobre el desarrollo de plántulas de café. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 149-158.
- Coa, M., Méndez Natera, J. R., Silva Acuña, R., & Mundarain Padilla, S. (2014). Evaluación de métodos químicos y mecanismos para promover la germinación de fosforitos en café (*Coffea arabica*) var. Catuaí Rojo. *Idesia*, 32(1), 43-53.
- Cray, J. A., Connor, M. C., Stevenson, A., Houghton, J. D. R., Rangel, D. E. N., Cooke, L. R., & Hallsworth, J. E. (2016). Biocontrol agents promote growth of potato pathogens, depending on environmental conditions. *Microbial Biotechnology*, 9(3), 330-354. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12349>
- Díaz, A., Suárez Pérez, C., Díaz Milanes, D., López Pérez, Y., Morera Barreto, Y., & López, J. (2016). Influencia del bioestimulante FitoMas-E sobre la producción de posturas de caféto (*Coffea arabica* L.). *Centro Agrícola*, 43(4), 29-35.
- Dutra, A. S., Silva, F. G., Benedito, C. P., & Torres, S. B. (2014). Germinação e vigor de sementes de maxixe tratadas com fósforo. *Hortic. bras*, 31(2).
- Ede, A. E., Ndubuaku, U. M., & Baiyeri, K. P. (2015). Media effects on emergence and growth of moringa (*Moringa oleifera* Lam) seedlings in the nursery. *American Journal of Experimental Agriculture*, 3(7), 182-189.
- Encalada, M. E. (2017). *Efecto de la luz solar y tres fechas de siembra en el desarrollo de posturas de caféto (Coffea arabica L. cv. Caturra) en la Zona Sur de Ecuador* [PhD Thesis]. Editorial Universitaria.
- Estrada, G. A., Baldani, V. L. D., De Oliveira, D. M., Urquiaga, S., & Baldani, J. I. (2013). Selection of phosphate-solubilizing diazotrophic Herbaspirillum and Burkholderia strains and their effect on rice crop yield and nutrient uptake. *Plant and Soil*, 369(1-2), 115-129. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1550-7>
- Evans, E. (2014). *FE573/FE573: Análisis Marginal: Un Procedimiento Económico para Seleccionar Tecnologías o Prácticas Alternativas*. Ask IFAS - Powered by EDIS. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/FE573>
- Fernández, C. J. (2015). *Efecto de bacterias promotoras de crecimiento vegetal en el cultivo de café (Coffea arabica L. cvTípica) en sus primeros estadios de su desarrollo* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Lima]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1888/P34.F4-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- GEAM. (2012). *Informe resumen sobre el programa del café y las acciones que se acometen*. (Grupo Empresarial Agricultura De Montaña, p. 7). Ministerio de La Agricultura.
- Gebreselassie, W., Mohammed, A., & Netsere, A. (2010). Pre-sowing treatment of coffee (*Coffea arabica* L.) seeds to enhance emergence and subsequent growth of seedlings. *Res. J. Seed Sci*, 3, 218-226.
- González, M. E., Castilla Valdés, Y., & Hernández Rodríguez, A. (2011). Obtención de suspensiones celulares y embriones somáticos de caféto (*Coffea canephora* P.) con el empleo de metabolitos bacterianos. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 13(1), 123-131.
- González, M. E., Rosales Jenqui, P., Castilla Valdés, Y., Lacerra Espino, J. Á., & Ferrer Viva, M. (2015). Efecto del Bioenraiz® como estimulante de la germinación y el desarrollo de plántulas de caféto (*Coffea arabica* L.). *Cultivos Tropicales*, 36(1), 73-79.
- Gotteland, M., & De Pablo, S. (2007). Algunas verdades sobre el café. *Revista chilena de nutrición*, 34(2), 105-115.
- Gouda, S., Kerry, R. G., Das, G., Paramithiotis, S., Shin, H.-S., & Patra, J. K. (2018). Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture. *Microbiological research*, 206, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2017.08.016>
- Gupta, G., Snehi, S. K., & Singh, V. (2017). Role of PGPR in Biofilm Formations and Its Importance in Plant Health. En I. Ahmad & F. M. Husain (Eds.), *Biofilms in Plant and Soil Health* (1.ª ed., pp. 27-42). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119246329.ch2>
- Hernández, A., Heydrich-Pérez, M., Diallo, B., El Jaziri, M., & Vandeputte, O. M. (2010). Cell-free culture medium of *Burkholderia cepacia* improves seed germination and seedling growth in maize (*Zea mays*) and rice (*Oryza sativa*). *Plant Growth Regulation*, 60(3), 191-197. <https://doi.org/10.1007/s10725-009-9433-5>
- Hernández, A., Pérez, J. M., Bosch, D., & Castro, N. (2015). *Clasificación de los Suelos de Cuba*. INCA.
- Hernández, I., Nápoles García, M. C., & Morales Mena, B. (2015). Caracterización de aislados de rizobios provenientes de nódulos de soya (*Glycine max* (L.) Merrill) con potencialidades en la promoción del crecimiento vegetal. *Cultivos Tropicales*, 36(1), 65-72.
- Hernández, I., & Nápoles, M. C. (2017). Rizobios residentes en la rizosfera de plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) cultivar INCA LP-5. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 39-49.
- Hernández, I., & Nápoles, M. C. (2019). Rhizobia Promote Rice (*Oryza sativa* L.) Growth: First Evidence in Cuba. En D. Zúñiga-Dávila, F. González-Andrés, & E. Ormeño-Orrillo (Eds.), *Microbial Probiotics for Agricultural Systems* (pp. 155-168). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-17597-9_10

- Ibarra, J. C., Aguirre-Medina, J. F., Coss, L.-D., Cadena-Iñiguez, J., & Zavala-Mata, G. A. (2014). *Coffea canephora* (Pierre) ex Froehner inoculado con micorriza y bacteria fijadora de nitrógeno en vivero. *Revista Chapingo. Serie horticultura*, 20(2), 201-213.
- Jácóme, C. S., Quintana, Y. G., Rubio, J. P. G., Crespo, Y. A., Pérez, Y. L., & Morales, A. (2019). Efecto de *Trichoderma harzianum* como bioestimulante en el crecimiento de plántulas de *Swietenia macrophylla* en condiciones de vivero. *Revista Amazónica. Ciencia y Tecnología*, 8(1), 40-51.
- Jiménez, A., Flores-Félix, J. D., García-Fraile, P., Mateos, P. F., Menéndez, E., Velázquez, E., & Rivas, R. (2018). Probiotic activities of *Rhizobium laguerreae* on growth and quality of spinach. *Scientific Reports*, 8(1), 295.
- Julca, A., Andia Alarcón, E., Estelita Castro, S., & Borjas Ventura, R. (2018). Comportamiento de *Coffea arabica* L. injertadas sobre *Coffea canephora* en presencia de nematodos en vivero: Growth of *Coffea arabica* grafted onto *Coffea canephora* in presence of nematodes in nursery. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(3), 267-280.
- Kanwar, R., Mehta, D. K., & Lal, M. (2014). Effect of seed priming on physiological parameters of aged and non-aged seeds of bitter melon, *Momordica charantia* L. *International Journal of Farm Sciences*, 4(3), 24-32.
- Kasim, W. A., Gaafar, R. M., Abou-Ali, R. M., Omar, M. N., & Hewait, H. M. (2016). Effect of biofilm forming plant growth promoting rhizobacteria on salinity tolerance in barley. *Annals of Agricultural Sciences*, 61(2), 217-227.
- Khan, M. S., Zaidi, A., & Wani, P. A. (2009). Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Sustainable Agriculture-A Review. En E. Lichtfouse, M. Navarrete, P. Debaeke, S. Véronique, & C. Alberola (Eds.), *Sustainable Agriculture* (pp. 551-570). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_34
- Leaungvutiviroj, C., Ruangphisarn, P., Hansanimitkul, P., Shinkawa, H., & Sasaki, K. (2010). Development of a New Biofertilizer with a High Capacity for N₂ Fixation, Phosphate and Potassium Solubilization and Auxin Production. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 74(5), 1098-1101. <https://doi.org/10.1271/bbb.90898>
- López, Y. (2016). *Efecto del bioestimulante FitoMas-E y diferentes sustratos sobre la producción de posturas de cafeto (Coffea arabica L.)* [Tesis de Maestría]. Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez".
- Lugtenberg, B., & Kamilova, F. (2009). Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 63(1), 541-556. <https://doi.org/10.1146/annurev.micro.62.081307.162918>
- Machado, R. G., de Sá, E. L. S., Bruxel, M., Giongo, A., da Silva Santos, N., & Nunes, A. S. (2013). Indoleacetic Acid Producing Rhizobia Promote Growth of Tanzania grass (*Panicum maximum*) and Pensacola grass (*Paspalum sauriae*). *International Journal of Agriculture & Biology*, 15(5). https://www.researchgate.net/profile/Enilson-Sa/publication/256538004_Indoleacetic_Acid_Producing_Rhizobia_Promote_Growth_of_Tanzania_grass_Panicum_maximum_and_Pensacola_grass_Paspalum_saurae/links/0deec523d44d953d1000000/Indoleacetic-Acid-Producing_Rhizobia_Promote_Growth_of_Tanzania_grass_Panicum_maximum_and_Pensacola_grass_Paspalum_saurae.pdf
- Mag, & Gad, P. (2016). *cafedequito.com this domain has already been registered. However, interested party can still solicit a request to buy it from owner.* <http://www.cafedequito.com/wp-content/uploads/2016/09/>
- Marquina, M. E., Ramírez, Y., & Castro, Y. (2018). Efecto de bacterias rizosféricas en la germinación y crecimiento del pimentón *Capsicum annum* L. Var. Cacique gigante. *Bioagro*, 30(1), 3-16.
- Martins, L. D., Tomaz, M. A., do Amaral, J. F. T., Bragança, S. M., Rodrigues, W. N., & dos Reis, E. F. (2013). Nutritional efficiency in clones of conilon coffee for phosphorus. *Journal of Agricultural Science*, 5(1), 130.
- Mazher, A., Abdel-Aziz, N., El-Dabh, R. S., El-Khateeb, M. A., & Abd El-Badaie, A. (2014). Effect of bio fertilization on growth and constituents of *Moringa oleifera* Lam. Plants. *Middle East J. Agric. Res*, 3(4), 793-798.
- Mia, M. B., & Shamsuddin, Z. H. (2010). Rhizobium as a crop enhancer and biofertilizer for increased cereal production. *African journal of Biotechnology*, 9(37), 6001-6009.
- Mia, M. B., Shamsuddin, Z. H., & Mahmood, M. (2012). Effects of rhizobia and plant growth promoting bacteria inoculation on germination and seedling vigor of lowland rice. *African Journal of Biotechnology*, 11(16), 3758-3765.
- Midekssa, M. J., Loscher, C., Schmitz, R., & Assefa, F. (2015). Characterization of phosphate solubilizing rhizobacteria isolated from lentil growing areas of Ethiopia. *African Journal of Microbiology Research*, 9(25), 1637-1648.
- Mohammed, A. F. (2018). Effectiveness of exopolysaccharides and biofilm forming plant growth promoting rhizobacteria on salinity tolerance of faba bean (*Vicia faba* L.). *African Journal of Microbiology Research*, 12(17), 399-404.
- Mohammed, A., Wosene Gebreselassie, W. G., & Tigist Nardos, T. N. (2013). Effect of Effective Microorganisms (EM) seed treatment and types of potting mix on the emergence and growth of coffee (*Coffea arabica* L.) seedlings. *Int. J. Agric. Res.*, 8. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20133248109>
- Molina, D., Bustillos-Cristales, M. del R., Rodríguez-Andrade, O., Morales-García, Y. E., Santiago-Saenz, Y., Castañeda-Lucio, M., & Muñoz-Rojas, J. (2015). Mecanismos de fitoestimulación por rizobacterias, aislamientos en América y potencial biotecnológico. *Biológicas*, 17(2), 24-34.

- Muleta, D., Assefa, F., Börjesson, E., & Granhall, U. (2013). Phosphate-solubilising rhizobacteria associated with *Coffea arabica* L. in natural coffee forests of southwestern Ethiopia. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 12(1), 73-84.
- Muñoz, H. J., Sáenz Reyes, J. T., Coria Avalos, V. M., García Magaña, J. de J., Hernández Ramos, J., & Manzanilla Quijada, G. E. (2015). Calidad de planta en el vivero forestal La Dieta, Municipio Zitácuro, Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(27), 72-89.
- Naseem, H., Ahsan, M., Shahid, M. A., & Khan, N. (2018). Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance. *Journal of Basic Microbiology*, 58(12), 1009-1022. <https://doi.org/10.1002/jobm.201800309>
- Noumavo, P. A., Agbodjato, N. A., Baba-Moussa, F., Adjanohoun, A., & Baba-Moussa, L. (2016). Plant growth promoting rhizobacteria: Beneficial effects for healthy and sustainable agriculture. *African Journal of Biotechnology*, 15(27), 1452-1463.
- Odoh, C. K. (2017). Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): A bioprotectant bioinoculant for sustainable agrobiolgy. A review. *Int J Adv Res Biol Sci*, 4(5), 123-142.
- OIC. (2019). *Informe sobre desarrollo cafetero de 2019. Crecer para prosperar: Viabilidad económica como catalizador de un sector cafetero sostenible*. <https://ico.org/documents/cy2019-20/ed-2320c-coffee-development-report.pdf>
- Oliveira, C. A., Alves, V. M. C., Marriel, I. E., Gomes, E. A., Scotti, M. R., Carneiro, N. P., Guimaraes, C. T., Schaffert, R. E., & Sá, N. M. H. (2009). Phosphate solubilizing microorganisms isolated from rhizosphere of maize cultivated in an oxisol of the Brazilian Cerrado Biome. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(9), 1782-1787.
- Oliveira, M. H., Almeida, G. R. R., da Cunha, L. T., & Queiroz, R. L. (2016). INTERAÇÕES ALELOPÁTICAS SOBRE O DESENVOLVIMENTO DE ALFACE (*Lactuca sativa*, L. cv. Vanda) CULTIVADA EM SOLO CAFEEIRO. *Revista da UI_IPSantarém*, 4(4), 16-16.
- Ortiz, V., ORDAZ CHAPARRO, V., Aldrete, A., ESCAMILLA PRADO, E., SÁNCHEZ VIVEROS, G., & LÓPEZ ROMERO, R. (2018). Tratamientos pregerminativos en semillas de dos especies del género *Coffea*. *Agroproductividad. Agroproductividad*, 11(4), 68-73.
- Oteino, N., Lally, R. D., Kiwanuka, S., Lloyd, A., Ryan, D., Germaine, K. J., & Dowling, D. N. (2015). Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. *Frontiers in microbiology*, 6, 745.
- Parralles, G. T. (2018). *Determinación de las características morfológicas de 20 variedades e híbridos de café arábigo de alto valor genético*. Universidad Estatal Del Sur De Manabí.
- Parray, J. A., Jan, S., Kamili, A. N., Qadri, R. A., Egamberdieva, D., & Ahmad, P. (2016). Current Perspectives on Plant Growth-Promoting Rhizobacteria. *Journal of Plant Growth Regulation*, 35(3), 877-902. <https://doi.org/10.1007/s00344-016-9583-4>
- Pedraza, R. O., Teixeira, K. R., Scavino, A. F., de Salamone, I. G., Baca, B. E., Azcón, R., Baldani, V. L., & Bonilla, R. (2010). Microorganismos que mejoran el crecimiento de las plantas y la calidad de los suelos. Revisión. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 11(2), 155-164.
- Pérez, R., Oudot, M., Serrano, L., Hernández, I., Nápoles, M., Sosa, D., & Pérez-Martínez, S. (2019). Rhizospheric rhizobia identification in maize (*Zea mays* L.) plants. *Agromía Colombiana*, 37(3), 255-262.
- Queiroz, A. S. B., Ságio, S. A., & Junior, T. T. (2020). Doses de fósforo no desenvolvimento da cultura da soja na região central do Tocantins. *Agri-Environmental Sciences*, 6, 7-7.
- Rahman, A., Hosokawa, S., Oono, Y., Amakawa, T., Goto, N., & Tsurumi, S. (2002). Auxin and ethylene response interactions during Arabidopsis root hair development dissected by auxin influx modulators. *Plant Physiology*, 130(4), 1908-1917.
- Reis, T. H. P., Neto, A. E. F., Guimarães, P. T. G., Curi, N., Guerra, A. F., & Marques, J. J. (2011). Dynamics of Forms of Inorganic Phosphorus in Soil under Coffee Plants as a Function of Successive Annual Additions of the Nutrient. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 42(8), 980-991. <https://doi.org/10.1080/00103624.2011.558966>
- Resende, J. C. F., Markewitz, D., Klink, C. A., Bustamante, M. M. D. C., & Davidson, E. A. (2011). Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: Impacts of frequent burning. *Biogeochemistry*, 105(1-3), 105-118. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9531-5>
- Reyes. (2014). *Estadística, Matemática y Computación*. <http://reyesestadistica.blogspot.com/2014/05/prueba-de-tukey-para%20experimentos.html>
- Reyes, F., Escamilla-Prado, E., Portilla, E. P., Almaguer-Vargas, G., Curiel-Rodríguez, A., & Gómez, J. H. (2016). Evaluación de productividad, calidad física y sensorial del grano del café (*Coffea arabica* L.), en cafetos injertados en el CRUO, Huatusco, Veracruz. *Revista de Geografía Agrícola*, 45-53.
- Rosado, M. M. L. (2019). DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NA GERMINAÇÃO DE COFFEA ARABICA. *Anais da Semana Acadêmica de Agronomia da Ufes-Campus de Alegre*. <https://periodicos.ufes.br/seagro/articula/view/27015>
- Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. *Boletín Técnico Cenicafe*, 32, 1-44.

- Salisbury, F. B., & Ross, C. W. (1992). *Plant physiology* (4ta ed.). Wadsworth Publishing Company. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=cYed5M9uH-nAC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Plant+physiology&ots=FIT7_JILBo&sig=Y6qd12_kNF2SOT4GT07dZpGLDBo
- Sánchez, D. B., Gómez-Vargas, R. M., Garrido Rubiano, M. F., & Bonilla Buitrago, R. R. (2012). Inoculación con bacterias promotoras de crecimiento vegetal en tomate bajo condiciones de invernadero. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 3(7), 1401-1415.
- Sánchez, J., & Cabrera, R. (2019). Inducción de embriogénesis somática a partir de explantes foliares en tres variedades de café. *Scientia Agropecuaria*, 10(2), 259-264.
- Santinato, F., Caione, G., Tavares, T. O., & Prado, R. de M. (2014). Doses of phosphorus associated with nitrogen on development of coffee seedlings. 6. <http://www.sbi-cafe.ufv.br/handle/123456789/8088>
- Senthilkumar, M., & Krishnamoorthy, R. (2017). Isolation and characterization of tomato leaf phyllosphere Methylobacterium and their effect on plant growth. *Int J Curr Microbiol App Sci*, 6(11), 2121-2136.
- Silva, M. R., Ignacio, L. A., & da Silva, G. A. (2017). Desenvolvimento de mudas de maracujá amarelo em função de diferentes doses fósforo reativo. *Rev Agron*, 6(1), 41-50.
- Solomon, E. P., Berg, L. R., & Martin, D. W. (2001). *Biología* (5ta ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Soto, F. (1980). ESTIMACION DEL AREA FOLIAR EN *C. arabica* L. A PARTIR DE LAS MEDIDAS LINEALES DE LAS HOJAS. *Cultivos tropicales*, 2(3), Article 3.
- Stringlis, I. A., Proietti, S., Hickman, R., Van Verk, M. C., Zamioudis, C., & Pieterse, C. M. J. (2018). Root transcriptional dynamics induced by beneficial rhizobacteria and microbial immune elicitors reveal signatures of adaptation to mutualists. *The Plant Journal*, 93(1), 166-180. <https://doi.org/10.1111/tpj.13741>
- Suparno, A., Prabawardani, S., Yahya, S., & Taroreh, N. (2015). Inoculation of arbuscular mycorrhizal fungi increase the growth of cocoa and coffee seedling applied with Ayamaru Phosphate Rock. *J. Agric. Sci.*, 7, 199-210.
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiología e desenvolvimento vegetal* (6ta ed.). Artmed Editora. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=PpO4DQAAQ-BAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=Fisiologia+desenvolvimento&ots=7SEhvXISVa&sig=bxTmLfYmacqsdOJh9UZ-C7MWYk>
- Terry, E., Ruiz Padrón, J., Tejada Peraza, T., & Reynaldo Escobar, I. (2014). Efectividad agrobiológica del producto bioactivo Pectimorf® en el cultivo del Rábano (*Raphanus sativus* L.). *Cultivos Tropicales*, 35(2), 105-111.
- Vargas, E. F., Guzmán, R. M. R., Peña, A. S., Luis, M. L. S., & Santana, I. A. R. (2016). Producción de plántulas de cafeto (*Coffea arabica*, L.) en vivero con sustratos orgánicos en un agroecosistema de montaña, municipio Junín estado de Táchira-Venezuela. *Universidad & ciencia*, 5(2), 139-151.
- Vega, P., Canchignia Martínez, H., González, M., & Seeger, M. (2016). Biosíntesis de ácido indol-3-acético y promoción del crecimiento de plantas por bacterias. *Cultivos tropicales*, 37, 33-39.
- Velasco, A., Castellanos-Hernández, O., Acevedo-Hernández, G., Aarland, R. C., & Rodríguez-Sahagún, A. (2020). Bacterias rizosféricas con beneficios potenciales en la agricultura. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 333-345.
- Vincent, J. M. (1970). *A manual for the practical study of the root-nodule bacteria*. International Biological Programme. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19711702844>
- Viñals, R., Bustamante-González, C. A., Ramos-Hernández, R., Sánchez-Durán, O., Moran-Rodríguez, N., & Ferrás-Negrín, Y. (2017). Empleo de bioproductos en la producción de posturas de *Coffea arabica* L. *Café Cacao*, 16(1), 35-43.