

## CAPÍTULO 4

# *Gmelina arborea* como modelo experimental en laboratorio, vivero y campo



Ximena Carolina Pulido Villamil<sup>1</sup>  
Laura Daniela Devia Grimaldo<sup>2</sup>  
Lizeth Carolina Ospina Cespedes<sup>1</sup>  
Gisou Diaz Rojo<sup>3</sup>  
Maryeimy Varón López<sup>1</sup>  
Jose Alexander Correa Díaz<sup>4</sup>  
Joseph Fernando Cristancho Gomez<sup>1</sup>  
Gloria Lucia Martinez Restrepo<sup>1</sup>  
Indira García Quintero<sup>1</sup>  
Jairo Ricardo Mora Delgado<sup>1</sup>

<https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap4>

---

1 Departamento de Química, Grupo de Química Aplicada a Procesos Ecológicos (QUAPE), Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

2 Departamento de Biología, Grupo de investigación Genética y Biotecnología Vegetal, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

3 Departamento de Matemáticas y Estadística, Grupo de Investigación en Análisis Estadístico de la Universidad del Tolima -GINVAE-UT, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

4 Departamento de Producción Pecuaria, Grupo de Investigación Sistemas Agroforestales Pecuarios, Universidad del Tolima, Ibagué, Colombia.

## Resumen

*Gmelina arborea* es una especie de importancia agroforestal y puede ser considerada como modelo experimental en el laboratorio, vivero y campo. En este capítulo se muestran resultados de la interacción de esta planta con el suelo y los microorganismos, a nivel de laboratorio, se enfoca en el aislamiento de solubilizadores de fosfato a partir de suelo asociado a cuatro árboles de las mejores progenies de esta especie. En vivero, se estudió el efecto de la inoculación de consorcios microbianos en la germinación y el crecimiento de la planta; en campo, se evaluó un arreglo agroforestal de callejón de pasturas de *Bohtriochloa pertusa* e interacción con esta especie. Los resultados sugieren que el suelo asociado a *G. arborea* es un reservorio de microorganismos solubilizadores de fosfato nativos y el aislamiento de estos, es más favorable en época de baja precipitación. En vivero, *G. arborea* responde a la fertilización química, pero esta puede ser sustituida hasta un 75% sin que se afecten los indicadores de crecimiento y en campo, *G. arborea* compete con éxito por espacio con *B. pertusa*, aunque puede haber una reducción del forraje debido a la interceptación de radiación fotosintéticamente activa en el dosel, que afecta la producción de materia seca.

**Palabras Claves:** Comunidades microbianas, Sistema agroforestal, Microorganismos promotores de crecimiento, Fosfato.

## Abstract

*Gmelina arborea* is an important agroforestry species and can be considered an experimental model in the laboratory, nursery, and field. This chapter presents the results of the interaction of this plant with soil and microorganisms. At the laboratory level, the focus is on isolating phosphate solubilizers from soil associated with four of the best progeny trees of this species. In the nursery, the effect of inoculation of microbial consortia on plant germination and growth was studied, and in the field, an agroforestry arrangement of *Bohtriochloa pertusa* pasture alleys and its interaction with this species was evaluated. The results suggest that the soil associated with *G. arborea* is a reservoir of phosphate-solubilizing microorganisms native to tropical dry forests, and their isolation is more favorable during periods of low rainfall. In the nursery, *G. arborea* responds to chemical fertilization, but this can be replaced up to 75% without affecting growth indicators and in the field, *G. arborea* competes successfully for space with *B. pertusa*, although there may be a reduction in forage due to the interception of photosynthetically active radiation in the canopy, which affects the production of dry matter.

**Keywords:** Microbial communities, Agroforestry system, Growth-promoting microorganisms, Phosphate.

## Cómo citar este capítulo

Pulido Villamil, X. C., Devia Grimaldo, L. D., Ospina Céspedes, L. C., Díaz Rojo, G., Varón López, M., Correa Díaz, J. A., Cristancho Gómez, J. F., Martínez Restrepo, G. L., García Quintero, I., & Mora Delgado, J. R. (2025). *Gmelina arborea* como modelo experimental en laboratorio, vivero y campo. En N. C. Higuera Mora & R. H. Posada Almanza (Eds.), *Comunidades y diversidad biológica en sistemas agrícolas y agroforestales* (pp. 135–166). Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-788-5.cap4>

## Introducción

*Gmelina arborea* es una especie leñosa originaria de la India, su importancia agroforestal radica en los múltiples usos reportados, como en el establecimiento de plantaciones comerciales (Ramírez et al. 2011; Ramírez-Gil, 2019); puede estar asociada a cultivos de ciclo corto y gramíneas; como en sistemas de reforestación (Hernández-Castro et al. 2021). También, es una especie útil en la generación de servicios ambientales, como prácticas de conservación y recuperación de suelos (Guillermo-Ramírez, 2017) y alto potencial en el secuestro del carbono, disminuyendo esta molécula de la atmósfera, por lo cual, es una especie funcional ante el cambio climático (Tamang et al. 2021).

Dada su importancia, es necesario garantizar el desarrollo de esta planta en diferentes condiciones de ecosistemas de bosque seco tropical. Para ello, se puede usar la inoculación de bacterias, hongos y hongos micorrízicos arbusculares (Zambrano & Díaz, 2008; Hernández & Salas, 2009; Ramírez-Gil, 2019) como alternativa para mejorar la fertilidad del suelo y el crecimiento de esta planta.

Diferentes estudios se han enfocado en demostrar el papel de los microorganismos en la interacción con *G. arborea*. Por ejemplo, Zambrano y Díaz (2008) inocularon *Azospirillum brasilense* inmovilizado en microperlas de alginato y los hongos micorrízicos arbusculares *Glomus manihotis* y *Glomus occultum* en semillas de esta planta en la costa norte de Colombia, en dos sustratos de siembra, suelo y turba compactada, determinando la respuesta de la germinación y del crecimiento de plántulas, demostrándose que el mejor tratamiento fue la inoculación con *Azospirillum brasilense* y el sustrato suelo (Zambrano & Díaz, 2008). Además, se ha estudiado el efecto de la inoculación de *Glomus fasciculatum* en la zona sur de Costa Rica, evidenciándose que variables como el diámetro basal, altura total, peso seco del follaje y radicular, absorción de nutrimentos en el follaje y el sistema radicular mostraron incrementos de 16.9 % en promedio; mientras que las plantas inoculadas en campo presentaron diferencias significativas en diámetro, altura total y absorción de nutriente con un incremento en los porcentajes del 37.9, 31.7 y 32.2%, respectivamente (Hernández & Salas, 2009). También, se evaluó la dependencia, colonización y crecimiento de esta planta frente a la inoculación con *Rhizoglomus fasciculatum*, *Rhizoglomus aggregatum*, *Rhizoglomus irregulare*, *Glomus fistulosum* y *Entrophospora colombiana* en suelo de Medellín, Colombia, y a diferentes concentraciones de fósforo, demostrándose que las plantas

inoculadas con *R. fasciculatum*, *R. aggregatum*, *R. irregulare* presentaron un aumento significativo en su crecimiento (Ramírez-Gil, 2019).

El crecimiento de las plantas es la respuesta a las condiciones bióticas y abióticas del entorno, entre ellas la fertilidad del suelo; depende de las interacciones bioquímicas gobernadas por microorganismos a nivel de la rizosfera (Gupta et al. 2022; Hartmann & Six, 2023; Hermans et al. 2023). Los microorganismos se encuentran ampliamente distribuidos en el suelo, y después de las plantas representan la mayor fracción de biomasa global en la tierra; siendo las bacterias las más abundantes (15%), seguido por los hongos con un 2% y las arqueas con 1%; así, el suelo es el mayor reservorio de la diversidad microbiana en la tierra con aproximadamente más de 50.000 especies y 0.5 mg de biomasa microbiana por gramo de suelo (Banerjee & Van der Heijden, 2023).

La diversidad de la comunidad microbiana puede tener influencia directa o indirecta en la salud del suelo, planta, animal e indirectamente en la salud humana. Los efectos directos están relacionados con el ciclo de nutrientes principalmente el del nitrógeno, fósforo, hierro, entre otros; esto incluye fijación de nitrógeno, nitrificación, desnitrificación, solubilización de fosfato, formación de sideróforos y contribuir a mantener la fertilidad del suelo, etc. En cuanto a la salud de la planta, los efectos directos están relacionados con su crecimiento, productividad y nutrición (Banerjee & Van der Heijden, 2023).

La inoculación de las plantas y del suelo con microorganismos, solos o en consorcios, es una estrategia en prácticas agronómicas que contribuye a la producción sostenible, ya que promueve la eficiencia en el uso de los nutrientes, contribuyendo a mejorar la salud del suelo al reducir sustancialmente el uso de fertilizantes sintéticos y, por ende, disminuir sus efectos negativos (Maitra et al. 2021). La importancia de los microorganismos puede probarse a diferentes escalas: laboratorio, vivero y campo.

El papel de los microorganismos puede aprovecharse mediante el aislamiento y la caracterización de sus capacidades de promoción de crecimiento vegetal. En esta línea se destaca la solubilización de fosfato, actividad de gran interés para la elección de bioinoculantes a escala de laboratorio y la posterior evaluación de su efectividad en las plantas a escala de vivero y campo; por ejemplo, el uso de microorganismos solubilizadores de fosfato presentes en el suelo, pueden disminuir el uso de fertilizantes fosfatados y promover el crecimiento de las plantas (Suleimanova et al. 2023).

La respuesta de las plantas, en vivero y campo, a la biofertilización, constituye una prueba para medir el rendimiento, y en especial su capacidad de interacción con otras especies vegetales; esto es relevante cuando se trata de seleccionar especies leñosas y herbáceas para el diseño de sistemas agroforestales. Por otra parte, en las últimas cuatro décadas se ha hecho énfasis en la importancia de usar indicadores holísticos y de fácil obtención, como un criterio fundamental en la evaluación agronómica y ecofisiológica (Hunt et al. 2002).

De esta forma, evaluaciones en los viveros han demostrado que los parámetros más útiles para medir las respuestas de plantas forrajeras son el porcentaje de germinación, la tasa de crecimiento y la producción de biomasa (Melgarejo et al. 2010); en virtud de que estos indicadores integran respuestas fisiológicas y morfométricas de las plantas a diferentes tratamientos. Entre estos parámetros, la tasa de crecimiento y la producción de biomasa son los más sensibles a la inoculación con microorganismos. No obstante, esto depende de la especie evaluada y a su destinación forestal o agroforestal, por ejemplo, en *G. arborea*, la relación hoja-tallo es el parámetro más importante en la producción como forraje y el diámetro del tallo y la altura para medir su potencial maderable (Pakos, 2012).

Entre los indicadores más utilizados para evaluar calidad de suelo a escala de campo, se destacan la resistencia a la penetración (RP), un indicador de la estructura del suelo que está altamente asociado a otros atributos edáficos, por lo cual su determinación da idea del estado de otras características físicas del suelo; de hecho, la RP tiene una asociación lineal con la densidad aparente (DA), la humedad, la textura y la materia orgánica (MO) (Ramírez & Salazar, 2012; Lardy et al. 2022), de tal manera que a partir de la RP se podrían predecir los valores de los otros atributos mencionados (Domínguez et al. 2018). Agronómicamente, este es un indicador importante para la toma de decisiones ya que está asociado a la productividad de las plantas y a su incidencia en la salud edáfica; de tal manera que suelos con cultivos de sistemas radicales vigorosos, incidirán en el rendimiento de los cultivos y en la porosidad del suelo (Piñeros et al. 2019).

Por otro lado, la inoculación de microorganismos puede aumentar las interacciones de la comunidad microbiana, que conlleva a mejorar la fertilidad de los suelos, la cual es mayor en las proximidades de los árboles (Obrador et al. 2004), derivada de una intensa actividad microbiana en sitios de mayor

contenido de materia orgánica y presencia de exudados radicales; esto se refleja en la tasa de respiración de los microorganismos edáficos asociados a las raíces del componente leñoso (Piñeros et al. 2019; Durang et al. 2015).

En las plantas, la estructura del dosel es otra variable que tiene efecto sobre el suelo y las comunidades microbianas asociadas dadas sus características de posición, orientación, tamaño y forma; así, la arquitectura del dosel también puede considerarse como parte de su estructura, la cual cambia con escalas de tiempo afectadas por Accorrientes de viento, agua, y transmitancia o retención de la radiación solar (Weiss et al. 2004). Bajo esta variación del dosel, la radiación que llega al estrato rasante también es variable, por lo cual su medición es importante para entender las interacciones entre el componente leñoso, herbáceo y microorganismos en un sistema agroforestal. Así, la radiación fotosintéticamente activa (RAFA) medida bajo el dosel, y sobre el dosel, brinda una idea de la cantidad de luz que efectivamente llega a las plantas herbáceas, y por tanto, incide en su productividad (Rosati et al. 2021; METER, 2024).

Bajo estos antecedentes, este capítulo presenta los resultados del aislamiento de microorganismos solubilizadores de fosfato aislados de suelo asociado a *G. arborea* en un ecosistema de bosque seco tropical. Además, se evalúa el efecto de la inoculación de consorcios microbianos en plántulas de esta especie a escala de vivero, y se hacen evaluaciones en campo de un arreglo agroforestal de callejones de pastura y líneas de *G. arborea*, para monitorear las interacciones de esta especie con el componente herbáceo y el suelo (Figura 4.1).

Estos estudios fueron guiados con el propósito de generar hallazgos que validan la importancia de la interacción entre árboles y pastos potenciada por la acción de los microorganismos. En este orden, el objetivo de la presente investigación fue demostrar como *G. arborea* constituye un modelo experimental en laboratorio, vivero y campo de las interacciones suelo-planta-microorganismos.

## Metodología

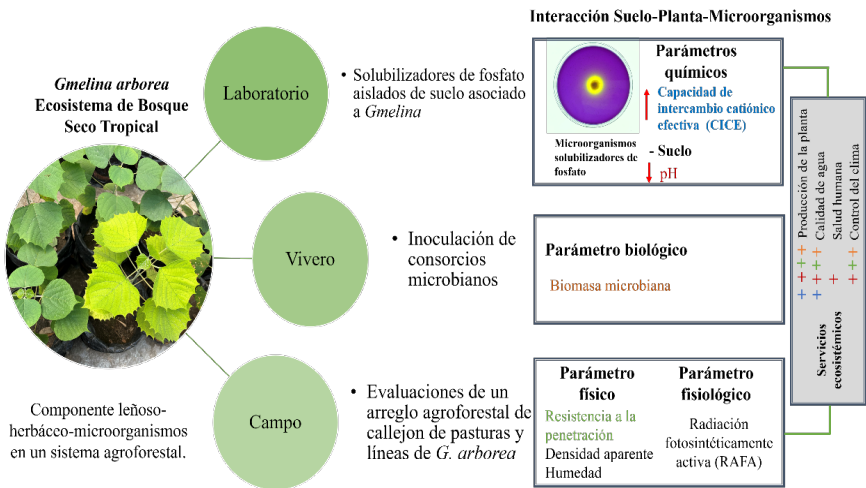
### Área de estudio

Las evaluaciones se realizaron a nivel de laboratorio, vivero y campo. Los primeros se desarrollaron en los laboratorios de Microbiología y Micorrizas (LMM) y en el de Ecofisiología Tropical (LEFT), los de vivero en el campus

de Santa Helena y finca las Brisas, y los de campo en la finca el Recreo localizada en el municipio del Guamo y Centro Universitario Regional del Norte de la Universidad del Tolima (CURN), ubicado en el municipio de Armero, (74°54'20.25". 5° 0'37.98"). Todos espacios experimentales adscritos a la Universidad del Tolima, bajo condiciones de bosque seco tropical según Holdridge (1977).

**Figura 4.1**

*Diagrama del modelo experimental de Gmelina arborea en laboratorio, vivero y campo y sus interacciones*



Fuente: Elaboración propia

En los suelos usados para los ensayos de laboratorio, vivero y campo se les realizó la caracterización fisicoquímica, la cual fue llevada a cabo por Agrilab Laboratorios S.A.S. En este análisis se tuvieron en cuenta los parámetros pH (conductimétrico), textura (análisis directo/Método de Bouyoucos), conductividad eléctrica (CE, conductimétrico), saturación de humedad media (gravimétrico) y los siguientes parámetros fueron determinados por cálculo que incluye densidad aparente, capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), la materia orgánica, el nitrógeno total y la saturación de Magnesio (Mg), Sodio (Na), Aluminio (Al), Potasio (K), Calcio (Ca), carbono orgánico oxidable, el Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Sodio (Na) intercambiable, el Hierro (Fe) y el Manganeseo (Mn), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Boro (B), Azufre (S) y Fósforo (P).

## Etapa de laboratorio

Suelo asociado a árboles adultos de *G. arborea* establecido en el CURN fue colectado para realizar los ensayos en laboratorio. Para ello, se realizaron dos muestreos del área circundante de cuatro individuos de las mejores progenies de esta especie (identificadas con las letras E, F, G y J); reconocidas mediante investigaciones previas de Melo Cruz et al. (2019). El muestreo 1 se realizó en el mes de abril de 2022 (época de alta precipitación) y el muestreo 2 se realizó en el mes de septiembre de 2023 (época de baja precipitación). Las muestras compuestas del suelo se tomaron a una profundidad de 0 a 20 cm, con un barreno tipo holandés; estas fueron transportadas y almacenadas a 4°C hasta su análisis físico, químico y microbiológico. Los dos muestreos realizados conformaron los grupos a comparar en el análisis estadístico.

## Aislamiento de microorganismos solubilizadores de fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Una vez extraídas las muestras de suelo desde campo en un rango de tiempo menor a 24h, se llevó a cabo el aislamiento de bacterias y hongos mediante la técnica de dilución seriada (Naqqash et al. 2022), a partir de 10 g de suelo suspendidos en 90 ml de solución salina al 0.85% (p/v) con agitación por 150 rpm durante una hora, se realizaron diluciones en serie de 1 ml en  $10^{-3}$ ,  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ . De cada dilución se sembró masivamente 100  $\mu\text{L}$  en medio Pikovskaya (PVK) suplementado con fosfato tricálcico  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  (Tabla 4.1) para detectar los microorganismos solubilizadores de  $\text{PO}_4^{3-}$ . Los cultivos se incubaron a 28°C durante cinco días y se determinaron las Unidades Formadoras de Colonia (UFC) a través de la siguiente fórmula:

$$\text{UFC/ml} = \frac{\text{Número de colonias contadas}}{(\text{volumen de la muestra en ml})(\text{factor de dilución})}$$

También, se observó la formación de un halo transparente o de acidificación de color amarillo alrededor de la colonia bacteriana y fúngica. El índice de solubilización (IS) se calculó mediante la siguiente fórmula.

$$\text{IS} = \frac{\text{Diámetro del halo (mm)} + \text{Diámetro de la colonia}}{\text{Diámetro de la colonia (mm)}}$$

De esta manera, se determinó y seleccionó el número de microorganismos solubilizadores de fosfato con  $IS \geq 2.5$ .

## Etapa de vivero

El trabajo de vivero fue realizado en la finca experimental “Las Brisas” ubicada en Ibagué, Colombia (4°25' 35.5"N75°13'47.8"W), a 1.285 m.s.n.m., con una temperatura promedio de 22 °C, humedad relativa del 94% y precipitaciones anuales de 1.620 mm.

En la Tabla 4.1 puede verse los valores de parámetros químicos y físicos de los suelos de la finca El Recreo.

**Tabla 4.1**

**Análisis físico-químico de suelos de la finca El Recreo, Guamo Tolima**

pH	MO (%)	CICE (meq/100g)	N (%)	P (mg/kg)	K (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Mg (mg/kg)	DA (g/cm <sup>3</sup> )	Textura
5.8	1.24	6.92	0.06	2.39	51.3	949	234	1.53	F-A-Ar

*pH*: potencial de hidrógeno; *MO*: materia orgánica; *CICE*: Capacidad Efectiva de Intercambio Catiónico; *DA*: densidad aparente; *F*: Franco, *A*: arcilloso, *Ar*: arenoso  
 Fuente: Elaboración propia

En vivero, se aplicó urea y se inoculó, en bandejas, el sustrato con un consorcio microbiano constituido *Paenibacillus taichungensis* y *Pseudomonas* sp. Se usó un testigo y tres niveles de sustitución a manera de tratamientos (T0, Urea; T1 Urea 75% +inóculo; T2 urea 50% + inóculo y T3, urea 25% + inóculo). Luego, entre el día 7 al 35 post-inoculación se registró semanalmente el número de plantas germinadas, para determinar el porcentaje de emergencia (%); para ello, se contaron todas las plántulas emergidas de más de un centímetro de altura. Una vez que más del 50% de las plantas alcanzaron la altura mínima de 10 cm se trasplantaron a bolsas en el día 42. Para ello, se separaron las plántulas provenientes de poliembrionía, para luego colocar una plántula una por bolsa de polietileno de 2.5 kg con sustrato de cascarilla de arroz y suelo en una proporción de 3:1, siguiendo las instrucciones del proveedor de la semilla. Se les proporcionó riego diario, ajustado según la precipitación y la humedad del suelo. La evaluación del crecimiento y desarrollo se llevó a cabo semanalmente, del día 60 al 123.

## Etapa de campo

La fase de campo, fue realizada en la granja experimental “El Recreo” de la Universidad del Tolima y localizado a  $74^{\circ}04'39''\text{W}$  y  $4^{\circ}35'46''\text{N}$  en el municipio de El Guamo (Tolima). Posee una temperatura promedio de  $28^{\circ}\text{C}$ , una precipitación promedio anual de 1.400 mm con régimen bimodal y una altitud de 326 m.s.n.m.

Se sembraron 200 plantas de 30 cm de altura de *G. arborea*, inoculadas con consorcio microbiano, a una distancia de dos metros entre plántulas, sobre una pastura de *Bohtriochloa pertusa* sin fertilización. Posteriormente, se hicieron mediciones de crecimiento con una cinta métrica, se contaron las hojas y se evaluó parámetros fisiológicos como Radiación Fotosintéticamente Activa (RAFA) usando un ceptómetro Acuppar LP 80. Además, se hicieron mediciones de indicadores físicos del suelo a tres distancias del tronco de *G. arborea* (10, 50, 100 y 150 cm) como se ilustra en la Figura 4.1. Se midió resistencia a la penetración con un penetrómetro de presión; densidad aparente con muestras no disturbadas tomadas con cilindros; la humedad del suelo se calculó mediante el método gravimétrico, secando la muestra de suelo al horno por 24 horas a  $110^{\circ}\text{C}$  y estableciendo la diferencia del peso de la muestra húmeda menos el peso de la muestra seca, y se lo expresa en porcentaje. Además, un aforo del estrato herbáceo usando un marco de  $50 * 50$  cm fue realizado en las tres distancias. La materia seca de tallos y hojas de *G. arborea* y forraje de *B. pertusa* se hizo en estufa siguiendo protocolos estandarizados de la AOAC (1965). La actividad microbiana en el suelo fue determinada por respirometría siguiendo el protocolo del IGAC (1990), y la biomasa microbiana con el método de Vance et al. (1987).

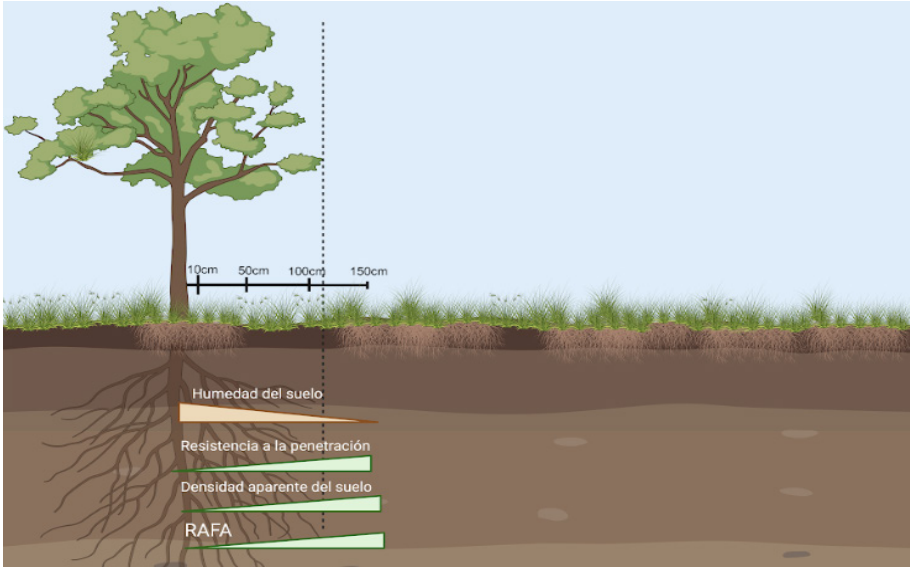
En la Figura 4.2, se representa la tendencia de las respuestas esperadas en cuanto a la resistencia a la penetración, densidad aparente, humedad del suelo y la RAFA transmitida en un sistema de *G. arborea* con *B. pertusa*.

## Análisis estadístico

Para todas las variables numéricas medidas en las tres etapas se calcularon medidas de tendencia central (media y mediana) y medidas de dispersión (desviación estándar, DE y rango intercuartílico, RIC). Además, se construyeron gráficas de barras y Boxplot para mostrar el comportamiento de los grupos comparados.

**Figura 4.2**

**Modelo analógico de los puntos de medición y sus tendencias en indicadores físicos del suelo**



*Fuente: Elaboración propia*

Para el análisis de los datos obtenidos en laboratorio, se realizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk y la prueba de homogeneidad de varianza de Levene. Para las variables que no presentaron distribución normal, se utilizó la prueba de Wilcoxon para comparar las dos épocas de interés, y para las variables que si presentaron normalidad como es el caso de las características fisicoquímicas del suelo, se utilizó la prueba t-Student. También, se calculó el coeficiente de correlación entre las variables de microorganismos solubilizadores de fosfato y parámetros fisicoquímicos del suelo como pH, CICE, N.A. y DA, entre otros, por medio del coeficiente de Pearson.

En el análisis de los datos de vivero y campo se realizó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk y la prueba de homogeneidad de varianza de Levene, para todas las variables cuantitativas. Para la comparación de los tratamientos, se utilizó un análisis de varianza (ANDEVA), y se aplicó una prueba de comparaciones múltiples de Tukey para los casos en que la ANDEVA detectó diferencias significativas entre los tratamientos. Para todos los análisis estadísticos se utilizó un nivel de significancia de  $\alpha=0.05$  y el software Infostat.

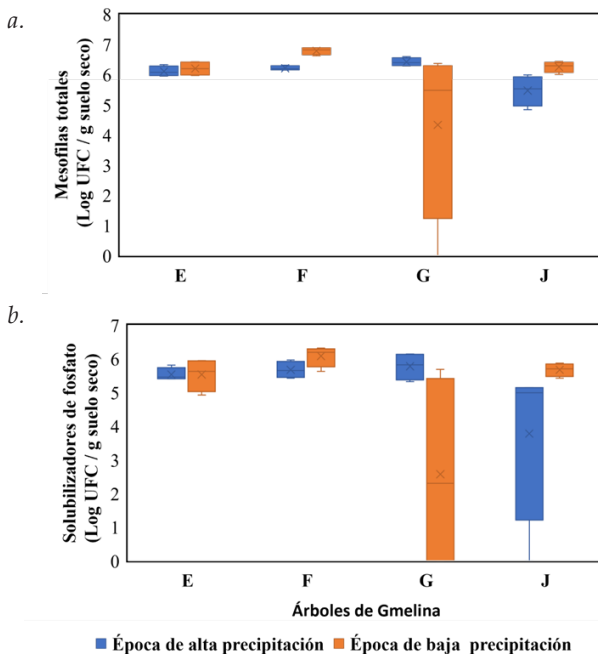
## Resultados y discusión

### Suelo asociado a *Gmelina arborea* como fuente de microorganismos solubilizadores de fosfato

El aislamiento de los microorganismos solubilizadores de fosfato asociados a suelo de *G. arborea*, en dos condiciones meteorológicas (alta y baja precipitación) y cuatro árboles diferentes (identificados con las letras E, F, G y J), mostró una abundancia de bacterias mesófilas totales con valores promedio entre 4.3-6.8 Log UFC/g de suelo seco y solubilizadores de fosfato con valores promedio entre 2.3-6.2 Log UFC/g de suelo seco, donde la mayoría de los solubilizadores fue obtenido bajo condiciones meteorológicas de baja precipitación como se muestra en las Figuras 4.3a y 4.3b.

**Figura 4.3**

*Conteo de microorganismos en suelo asociado a G. arborea de la época de alta precipitación (muestreo 1) y época de baja precipitación (muestreo 2), según los árboles. A. Mesófilas totales (Log UFC totales/g de suelo seco), B. Solubilizadores de fosfato tricálcico  $Ca_3(PO_4)$  (Log UFC/g de suelo seco)*



Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4.2 muestra la media y la desviación estándar para las variables Log UFC totales y Log UFC solubilizadores de fosfato asociados a los suelos de los árboles muestreados, en conjunto con la prueba de Wilcoxon. Se observan diferencias significativas para los árboles denominados J y F, que fueron los árboles que presentaron mayor abundancia para estos grupos microbianos. Esto permitió el aislamiento de mayor número de colonias y número de solubilizadores de fosfato en el muestreo 2 (Figura 4.3a) que se realizó en una época de baja precipitación en comparación con el muestreo 1 que corresponde a una época más lluviosa.

**Tabla 4.2**

**Resultados de la prueba de Wilcoxon de la variable número de colonias totales aislado del suelo asociado a *G. arborea* de la época de alta precipitación (muestreo 1) y época de baja precipitación (muestreo 2)**

Variable	Árbol		Época de alta precipitación	Época de baja precipitación	Prueba de Wilcoxon (p)
Bacterias mesófilas Totales (Log UFC/g)	E	Media ± DE	6.1 ± 0.2	6.2 ± 0.2	0.4857
		Mediana ± RIC	6.1 ± 0.2	6.2 ± 0.4	
	F	Media ± DE	6.2 ± 0.1	6.8 ± 0.1	<b>0.0286</b>
		Mediana ± RIC	6.2 ± 0.1	6.8 ± 0.3	
	G	Media ± DE	6.4 ± 0.1	4.3 ± 2.9	0.1143
		Mediana ± RIC	6.4 ± 0.2	5.5 ± 6.1	
	J	Media ± DE	5.5 ± 0.5	6.3 ± 0.2	<b>0.0286</b>
		Mediana ± RIC	5.5 ± 0.9	6.3 ± 0.3	
Solubilizadores de fosfato (Log UFC/g)	E	Media ± DE	5.5 ± 0.2	5.5 ± 0.5	1.0000
		Mediana ± RIC	5.5 ± 0.1	5.6 ± 1.0	
	F	Media ± DE	5.7 ± 0.3	6.1 ± 0.3	0.1143
		Mediana ± RIC	5.7 ± 0.4	6.2 ± 0.6	
	G	Media ± DE	5.8 ± 0.4	2.6 ± 3.0	0.1102
		Mediana ± RIC	5.8 ± 0.8	2.3 ± 4.6	
	J	Media ± DE	3.8 ± 2.5	5.7 ± 0.2	<b>0.0294</b>
		Mediana ± RIC	4.9 ± 5.1	5.7 ± 0.3	

Los valores que están en negrilla corresponden a las diferencias significativas  $p \leq 0.05$ .  
Desviación estándar (DE) y rango intercuartílico (RIC).

Fuente: Elaboración propia

Estudios similares realizados con suelo asociado a *G. arborea* han demostrado que es una fuente de microorganismos solubilizadores de fosfato dado que a partir de suelo rizosférico de estas plantaciones en Coimbatore, Tamil Nadu (India), se realizó el aislamiento de 24 microorganismos que incluyó 5 actinomicetos, 10 bacterias en medio Pikovskaya y 9 hongos con diferente morfología; algunos de los actinomicetos fueron eficaces en la solubilización de fosfatos y producen una cantidad significativa de ácido indol acético (AIA), seguido de bacterias y hongos (Mohan et al. 2018). De igual manera, se ha demostrado que a partir de diferentes muestras de zona de las raíces de *G. arborea* se han aislado microbios rizosféricos y se muestra que hay más UFC/g de suelo de bacterias en comparación a los actinomicetos y hongos (Mohan et al. 2018).

Por otra parte, en la variable solubilizadores de fosfato (Log UFC/g de suelo seco) solo existe diferencias significativas en el sitio J entre los dos muestreos (Figura 4.3b).

Así mismo, en cuanto al número de microorganismos solubilizadores de fosfato con un índice de solubilización (IS)  $\geq 2.5$ , se aislaron 9 y 22 bacterias en los muestreos 1 y 2, respectivamente. Esto indica que el suelo asociado a Melina actúa como un reservorio de solubilizadores de fosfato, representando el 100% de las bacterias aisladas en el muestreo 1 y el 91% en el muestreo 2. En contraste, los hongos con IS  $\geq 2.5$  estuvieron ausentes en el primer muestreo, mientras que en el segundo representaron el 9% del total de aislamientos. Por otra parte, estudios realizados con muestras de suelos de diferentes sistemas agroforestales en Tamil Nadu (India) reportan que las poblaciones bacterianas se encontraron en mayor proporción en comparación a las poblaciones fúngicas. Sin embargo, específicamente en el caso de las muestras de suelos asociadas a *G. arborea* se encontró más hongos (Radhakrishnan & Varadharajan, 2016) a diferencia de lo encontrado en este estudio en donde prevalecen más las bacterias.

Las características físicas y químicas del suelo asociado a plantaciones de *G. arborea* se muestran en la Tabla 4.3. En general, no se observan variaciones en cuanto a los parámetros analizados en las épocas de los dos muestreos, debido a que no se favorecen transformaciones en un tiempo tan corto en estas propiedades o no son notables. El suelo analizado tiene un pH entre 6 y 5.9; contiene en promedio 4.3 y 3.9% de MO, 0.2% de nitrógeno total, 3.3 y 2.39 mg/Kg de fósforo, respectivamente entre el muestreo 1 y el muestreo 2.

**Tabla 4.3**

*Características físicas y químicas del suelo asociado a G. arborea en el cual se realizó el aislamiento de microorganismos de la época de alta precipitación (muestreo 1) y la época de baja precipitación (muestreo 2)*

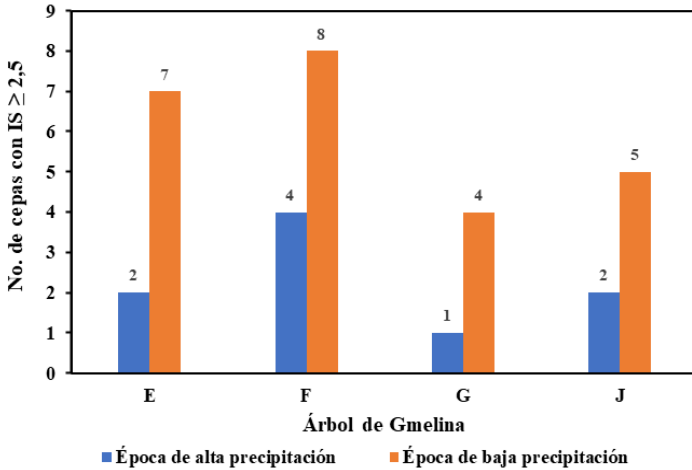
Parámetro	Unidades	Época de alta precipitación	Época de baja precipitación	Prueba t-Student p-valor
<b>Propiedades Químicas</b>				
pH		6.0±0.1	5.9±0.1	0.1372
CE	dS/m	0.3±0.0	0.4±0.1	0.9393
CICE	meq/100g	24.8±1.7	27.1±2.4	0.2077
N.A.	%	30.9±2.8	28.1±1.7	0.1753
COOx	%	2.5±0.3	2.2±0.5	0.2960
MO	%	4.3±0.5	3.9±0.9	0.2951
Ntotal	%	0.2±0.0	0.2±0.0	0.2950
P	mg/Kg	3.3±2.3	2.39±1.5	0.3416
DA	g/cm <sup>3</sup>	1.2±0.0	1.3±0.1	0.2289
K intercambiable	mg/kg	49.2±5.7	55.0±6.7	0.3370
Ca intercambiable	mg/kg	3220±214.8	3450±192.7	0.2967
Mg intercambiable	mg/kg	1038±149.7	1178±192.4	0.1779
Na intercambiable	mg/kg	22.1±2.3	25.3±3.3	0.0690
<b>Propiedades Físicas</b>				
Arcilla	%	42	40	
Arena	%	35	40.5	
Limo	%	23	19.5	
Textura	%	Arcilloso	Arcilloso	

*CE: Conductividad eléctrica, CICE: Capacidad de Intercambio catiónica efectiva, N.A. saturación de humedad media, COOx: Carbono Orgánico oxidable, MO: Materia orgánica, N total: Nitrógeno Total, DA: Densidad Aparente. Los valores corresponden a las medias de cuatro réplicas. medias ± desviación estándar para cada parámetro. Los datos fueron analizados con prueba t-Student pareada para comparar las diferencias significativas entre los dos muestreos.*

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 4.4**

Número de cepas con índice de solubilización de fosfato con un  $IS \geq 2.5$  aislado del suelo asociado a *G. arborea* de la época de alta precipitación (muestreo 1) y la época de baja precipitación (muestreo 2)



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las propiedades físicas del suelo asociado a plantaciones de *G. arborea*, es de textura arcillosa teniendo en cuenta los porcentajes de arcillas, arenas y limos que se observa en la Tabla 4.3.

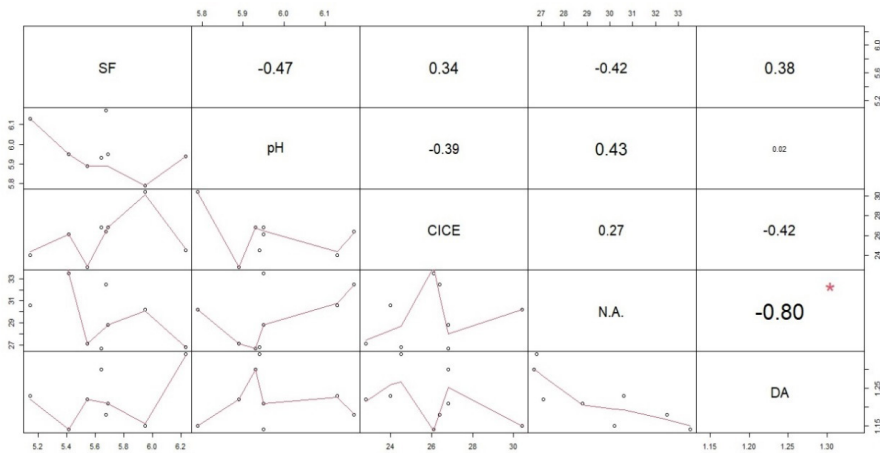
En la Figura 4.5 se muestra el gráfico con los coeficientes de correlación de Pearson entre los solubilizadores de fosfato y diferentes variables fisicoquímicas del suelo asociado a *G. arborea*. Se observa una correlación positiva entre los solubilizadores de fosfato con el CICE (0.34) y con la DA (0.38), mientras que una correlación negativa entre los solubilizadores de fosfato con los parámetros pH (-0.47) y N.A. (-0.42). Por otra parte, se calculó el coeficiente de correlación entre los solubilizadores de fosfato con las variables CE, COOx, MO y N total, detectándose muy baja correlación.

El pH del suelo es un parámetro químico fundamental que sirve como indicador universal de las características estructurales de las comunidades bacterianas y fúngicas del suelo (Lauber et al. 2008) y además, influye en las comunidades de bacterias solubilizadoras de fosfato inorgánico (Zheng et al. 2019). Los resultados obtenidos en este estudio sugieren una posible correlación negativa entre los solubilizadores de fosfato y la variable pH, que ha sido evidenciada por autores como Amri et al. (2023), quienes evaluaron

la correlación entre el promedio de la concentración de los solubilizadores de fosfato de 5 especies bacterianas con las propiedades del suelo, las cinco muestras de suelo, 4 y 1 fueron de tipo forestales y de agricultura, respectivamente, demostrándose una fuerte correlación negativa con el pH del suelo. Los aislados solubilizadores de fosfato aislados de suelos con pH entre 7.05 y 6.50 evidenciaron un alto potencial de solubilización de fosfatos. Esto probablemente, se relaciona con que las bacterias solubilizadoras, incrementan la disponibilidad de este anión por secreción de ácidos orgánicos que causan una disminución en el pH a 6.0 (Son et al. 2006), así, un mecanismo de acidificación implica la liberación de  $H^+$  que se asocian a la asimilación de cationes que con lleva a la solubilización de fosfato (Asea et al. 1998; Timofeeva, et al. 2022)

#### Figura 4.5

Gráfico de correlación entre solubilizadores de fosfato (Log UFC/g de suelo seco) y diferentes variables fisicoquímicas (pH, CICE, N.A. y DA) del suelo asociado a *G. arborea*. SF: Solubilizadores de fosfato, CICE: Capacidad de Intercambio catiónica efectiva, N.A: Saturación de Humedad media, DA: Densidad Aparente. \*Estadísticamente significativo  $p < 0.05$



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, aunque con los datos obtenidos los valores de la correlación no son tan altos, el hecho de que la correlación sea positiva entre los solubilizadores de fosfato y CICE, probablemente, se debe a que existe un

mecanismo alternativo para la solubilización de fosfatos minerales por la producción de ácidos orgánicos a partir de los que se libera  $H^+$  en la superficie extracelular vía intercambio catiónico o actividad ATPasa con translocación de  $H^+$  (Illmer & Schinner, 1995; Timofeeva, et al. 2022).

En cambio, con las otras variables fisicoquímicas mostradas en esta figura, que incluyen materia orgánica, saturación de humedad media la correlación fue baja. En otros estudios, se ha demostrado que la distribución de la población microbiana en algunos sistemas agroforestales está influenciada por factores edáficos como el pH, el contenido de humedad y la materia orgánica del suelo (Radhakrishnan & Varadharajan, 2016).

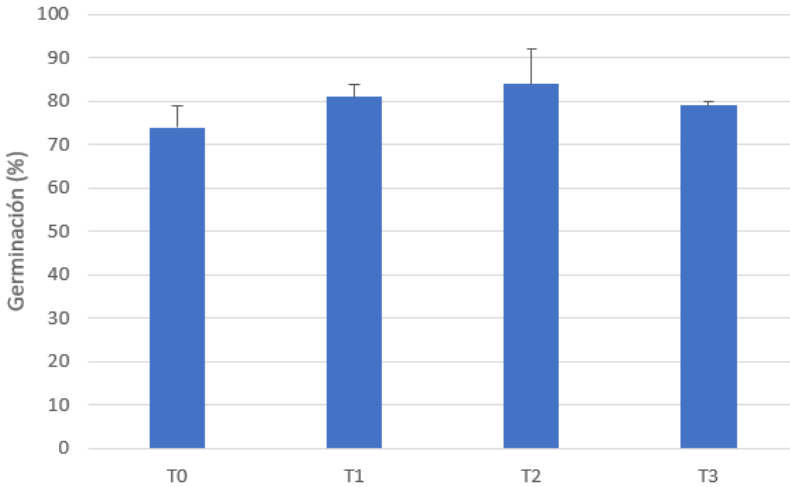
## Experimentos con *G. arborea* de inoculación de consorcios microbianos a escala de vivero

La influencia del inóculo de un consorcio de microorganismos en la fase de vivero fue evidente en este estudio. Así lo demuestra el indicador de germinación cuyos valores alcanzados del 80%, alrededor de los 35 días, sugieren que no hay diferencias entre el testigo (T0), en el cual se usó urea al 100%, respecto a los tratamientos donde se sustituyó la urea por inóculo de microorganismos. De hecho, los datos en el tiempo denotan una mejor respuesta en la germinación a los tratamientos con el consorcio (T1, T2 y T3) hasta los 28 días. De hecho, los datos en el tiempo denotan una tendencia de mejor respuesta en la germinación a los tratamientos con el consorcio (T1, T2 y T3) hasta los 21 días, pero sin diferencias significativas (Figura 4.6).

No obstante, desde el punto de vista productivo, un indicador fundamental de benevolencia de un estímulo es la producción de biomasa, pues esta sugiere la intensidad en el grado de aprovechamiento de los nutrientes extraídos del suelo. La Figura 4.7 y la comparación de las medias con la prueba Tukey ( $p < 0.05$ ), sugiere que no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos. En el mismo sentido, los datos de crecimiento de las plántulas, hasta los 120 días, confirman el efecto positivo de la sustitución de fertilizante por el bioinóculo, lo cual permite inferir que es factible sustituir hasta un 50% del abono nitrogenado, pues no se presentaron diferencias estadísticas entre T0 y T2. Es evidente la afectación negativa en el crecimiento cuando se sustituye el fertilizante en un 75% ( $p < 0.0001$ ).

**Figura 4.6**

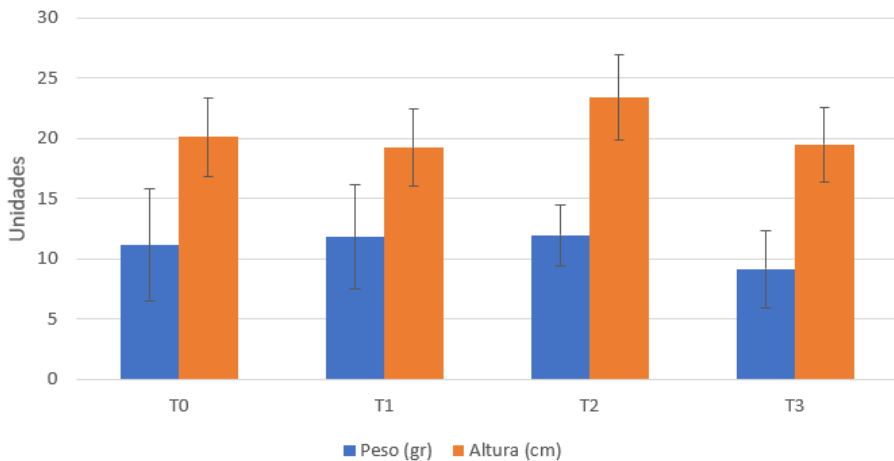
*Germinación a los 21 días de G. arborea a diferentes niveles de sustitución de fertilizante químico utilizando un inóculo microbiano en etapa de vivero. T0, Urea; T1 Urea 75% + inóculo; T2 urea 50% + inóculo y T3, urea 25% + inóculo*



*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 4.7**

*Promedio del peso seco y la altura de las plantas de G. arborea al día 90 entre tratamientos de sustitución de fertilizante químico*



*Fuente: Elaboración propia*

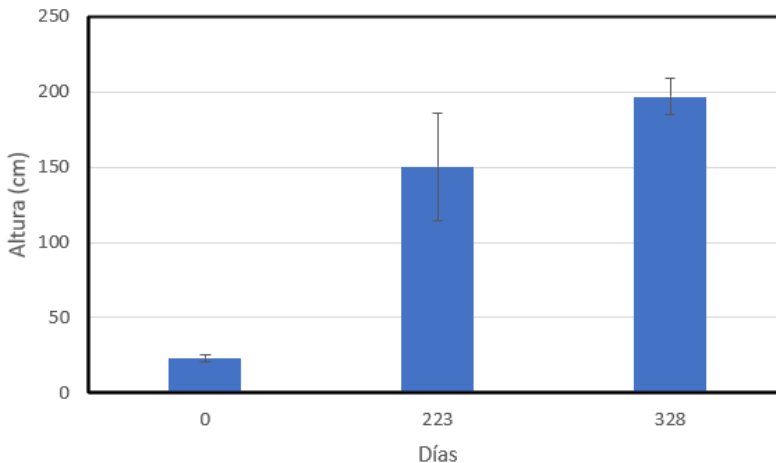
## Interacciones *G. arborea* con gramíneas a escala de parcela

Plantas vigorosas, crecidas bajo buenas condiciones de nutrición en la etapa de vivero, reflejan su potencial bajo condiciones de campo; especialmente, cuando deben competir con una especie herbácea para su establecimiento y desarrollo, como sucede en una silvopastura. Así, la interacción entre el componente leñoso y el estrato herbáceo constituye un tema de análisis importante en la escogencia de especies a asociar en un sistema agroforestal. De ahí, la relevancia de los resultados encontrados reportados en este capítulo.

Los datos del ensayo a escala de parcelas de campo denotan la buena respuesta de establecimiento de *G. arborea* asociada con *B. pertusa*. La altura promedio alcanzada de 197 cm a los 328 días (Figura 4.8) con una tasa de crecimiento de 0.52 cm/día, sugieren que, a pesar de ser un suelo con limitaciones físicas y químicas, la respuesta de Gmelina en términos de crecimiento fue aceptable si se compara con estimaciones con base a reportes de literatura, los cuales tuvieron una tasa de crecimiento entre 0.63 y 0.89 cm/día (Valverde et al. 2020; Mora y Manosalva, 2018)

**Figura 4.8**

*Crecimiento de Gmelina arborea en una pastura de Bohtriochloa pertusa en al Guamo (Tolima)*



Fuente: Elaboración propia

La influencia del sistema radical de *Gmelina* sobre una característica física del suelo sugiere una tendencia positiva, a medida que se acerca a la zona de mayor actividad rizosférica, cerca de la zona de mayor crecimiento radical. En la Tabla 4.4 se puede apreciar que la resistencia a la penetración es menor en el suelo bajo el dosel, disminuyendo a menor distancia del árbol y aumentando a medida que el suelo tiene menor influencia del sistema radical de la especie leñosa. Las diferencias son significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre las resistencias tomadas a menos de 0.5 m respecto a la gotera (1 m) y a la zona libre de influencia del dosel, a 1.5 m; así, los indicadores físicos del suelo tienden a valores de un suelo compactado en el área alejada de la influencia de la raíz del componente leñoso. Similar tendencia sugiere los datos de densidad aparente del suelo como pueden verificarse en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4**

*Promedio y desviación estándar de parámetros físicos del suelo determinados a escala de parcela*

Parámetros	0.1 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m
Resistencia a la penetración (MPa)	1.39±0.35	1.80±0.36	2.05±0.29	2.10±0.25
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.30±0.11a	1.36±0.13a	1.34±0.10a	1.40±0.05a
Humedad (%)	51.40±5.03a	44±3.16b	36.6±3.13c	21.8±1.92d

*Letras iguales denotan que no hay diferencias significativas entre distancias ( $p > 0.05$ )*

*Fuente: Elaboración propia*

Estos parámetros, se reflejan en la actividad microbiológica que actúa sobre la materia orgánica, expresándose en una mayor respiración. En la Tabla 4.4 se sugiere una tendencia de mayor actividad microbiana en las proximidades del cuello de la raíz respecto al suelo alejado de éste.

## La influencia sobre la biomasa comestible

Por otra parte, la interacción entre la especie leñosa y la herbácea se expresa en productividad de biomasa. En la Tabla 4.5 se aprecia una reducción del 8% del rendimiento del pasto a libre exposición respecto al crecimiento bajo el dosel de *G. arborea*, lo cual es el reflejo de una menor actividad fotosintética en el estrato rasante, derivado de la menor transmitancia de RAFA interferida por la lámina foliar de *G. arborea*. Como se puede ver en la Tabla 4.5, la diferencia

de RAFA transmitida bajo el dosel respecto a la luz captada por el sensor a libre exposición representa un 52.77% de reducción en la radiación incidente.

Pachas et al. (2018) y Gándara et al. (2019) demostraron que el nivel de intensidad de sombra que da el dosel del componente leñoso, en una silvopastura, es uno de los principales factores que afectan negativamente la producción de biomasa en los pastizales tropicales; esto a su vez, está relacionado con la arquitectura del árbol, altura y densidad arbórea. Cuando la transmitancia de la RAFA es mayor se favorece la llegada de suficiente radiación solar a los pastos, lo cual facilita la fotosíntesis; al respecto, Sun y Wang (2018) sostienen que la energía que impulsa la fotosíntesis en las plantas es la luz, que proviene principalmente de la radiación solar, esto ha sido documentado para demostrar una relación positiva entre la tasa fotosintética neta (Pn) y la radiación fotosintéticamente activa (RAFA).

**Tabla 4.5**

*Producción de forraje y radiación transmitida en un arreglo agroforestal con G. arborea*

Parámetros	Libre exposición	Bajo dosel
Forraje verde(g/m <sup>2</sup> )	806.40±31.43a	745.60±79.83b
Materia seca (g/m <sup>2</sup> )	266.11±10.37	246.05±26.34
RAFA (µm mol s <sup>-1</sup> m) <sup>-2</sup>	1666.30 ±727.81a	787.06±432.29b

*Medias con letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)*

*Fuente: Elaboración propia*

No obstante, esta reducción de la biomasa de la gramínea, podría compensarse con una producción de la biomasa en la lámina foliar de *G. arborea*, que puede alcanzar a 1097 ± 334 g/m<sup>2</sup> de forraje verde, con un 44.6% de materia seca. Los reportes de literatura dan cuenta del excelente valor nutricional de las hojas de *G. arborea* que alcanza a aportes de 78.5% de materia seca; un amplio rango de proteína que oscila entre 11.7 y 26.7% a través del año, con una alta digestibilidad dados los bajos contenidos de fibra detergente neutro (FDA) que oscilan entre 19 y 31.9% (Badillo, 2018).

*G. arborea* es una especie leñosa que entra en la categoría de especies de rápido crecimiento y, por lo tanto, importante para su uso en sistemas

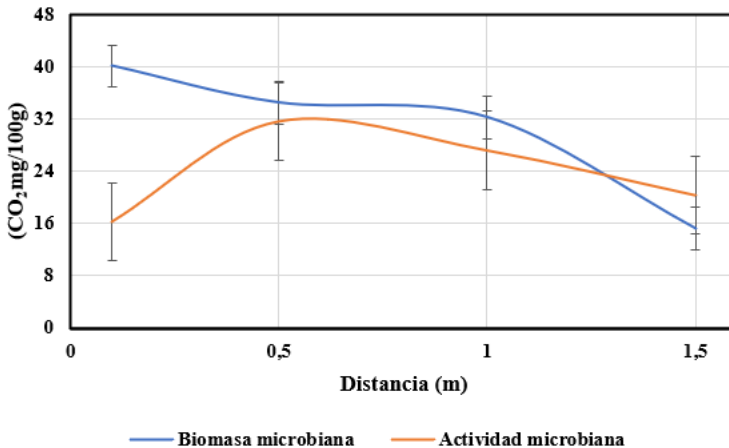
agroforestales. No obstante, es importante conocer sus características cuando se asocia a una especie herbácea, como es el caso de las gramíneas en una silvopastura. Los hallazgos en este estudio, sugieren que, si bien mejora características biofísicas del suelo, también constituye un factor de reducción en la producción de biomasa comestible en el estrato rasante. No hay reportes específicos del efecto de la sombra del dosel de *Gmelina* sobre gramíneas, pero los hallazgos en un sistema agroforestal de esta especie con cultivos de ciclo corto es un buen referente. Ya este efecto había sido reportado por Swamy y Mishra (2014), quienes observaron una disminución en soja del 8.1% a 34.5% y en trigo de 8.8% a 13.6% bajo diferentes densidades de siembra de *G. arborea*; esto se da básicamente por competencia por los recursos de luz y suelo; además, la disminución del 20-35% en la RAFA bajo rodales de *G. arborea*, disminuyen en un 28% en la producción de soja (Swamy et al. 2003). Por el contrario, otros estudios, han reportado un aumento significativamente mayor en el rendimiento de materia seca bajo sistema silvopastoril que en monocultivo (Kaleeswari, 2015).

Estos indicadores, se reflejan en la actividad microbiológica que actúa sobre la materia orgánica, expresándose en una mayor respiración. La Figura 4.9 sugiere una tendencia de mayor actividad microbiana en la parte media del dosel, respecto al borde de la copa, y de estas respecto a la zona a libre exposición (Figura 4.9). La baja actividad microbiana cerca al fuste del árbol, podría explicarse por un escaso volumen de biomasa de raíces finas en dicha zona; sin embargo, esta es una hipótesis que debe comprobarse. Si bien, la distribución de raíces finas es clara, pues varios autores confirman que la mayor densidad se presenta en la capa de suelo entre 0 – 30 cm (Jiang et al. 2016), no es clara la relación entre la distribución de raíces en la capa superficial del suelo (20 cm) y su distancia al fuste (Nambiar, 1983), por el contrario, Diaz (2019) y Bucheli et al. (2013) reportaron efectos significativos en la longitud y superficie de raíz y la densidad de raíces finas, respectivamente, de especies leñosas con respecto a la posición bajo la copa en la cual se extrajo la muestra, registrando que la mayor longitud de raíces finas es mayor cerca del fuste árbol (25% de copa) y disminuye con la distancia hacia el perímetro de la copa. Si la tendencia es como se expresa en estos dos últimos estudios citados, la explicación de la mayor actividad microbiana en la zona media del área de influencia del dosel en el suelo y una menor en el borde de la copa y en el suelo a libre exposición, esto podría obedecer a una mayor densidad de raíces (Arnáez & Ortiz, 2010) y suelo rizosférico, donde la actividad microbiana es

más intensa. La misma tendencia puede observarse en la actividad microbiana. Los resultados de la Figura 4.9, muestran que el suelo bajo el dosel presenta una biomasa estadísticamente superior al suelo alejado 1.5 m del fuste del árbol; la tendencia sugiere que entre más cerca al cuello de la raíz, la biomasa microbiana es mayor. Esto puede estar relacionado con una mejor condición ambiental, evidenciada por el mayor contenido de humedad bajo el dosel, que se incrementa a mayor cercanía del cuello de la raíz (Donoso et al. 2002; Lal, 2020).

**Figura 4.9**

*Actividad microbiana y biomasa microbiana en muestras de suelo a cuatro distancias del fuste de *G. arborea**



*Fuente: Elaboración propia*

Sin embargo, no hay un patrón de la influencia de la posición bajo el dosel o fuera de este sobre la productividad del forraje; ya que mientras unos estudios reportan un incremento de la biomasa forrajera en las proximidades del fuste del árbol (Casanova et al. 2022; Torres et al. 2009), otros estudios, muestran una tendencia muy irregular, aumentando significativamente el forraje con la distancia. Algunos estudios sugieren que esto es el resultado de interacciones entre la fertilidad del suelo (Piñeros et al. 2019; Obrador et al. 2004) y la transmitancia de la radiación solar a través del dosel arbóreo (METER, 2024; Rosati et al. 2021)

## Conclusiones

Los resultados obtenidos a nivel de laboratorio evidenciaron que el suelo asociado a *G. arborea* es un reservorio de microorganismos solubilizadores de fosfatos nativos de este bosque seco tropical. Es más favorable el aislamiento de estos microorganismos en época de baja precipitación en comparación a la época más lluviosa, en especial la población bacteriana prevalece. Es necesario que se continúe explorando los diferentes aislados por separados o en consorcios como una estrategia amigable desde el punto de vista ambiental, y como posible bioinoculantes que contribuyan a la disponibilidad de minerales para mejorar la productividad de los sistemas agroforestales en donde esta planta está presente.

A pesar de no detectar una correlación fuerte entre los solubilizadores de fosfato y algunos parámetros fisicoquímicos, se observó una relación directa entre los solubilizadores de fosfato con la capacidad de Intercambio catiónica efectiva, y densidad aparente del suelo asociado a esta planta, mientras que entre los solubilizadores de fosfato y los parámetros pH y saturación de humedad media, se observó una relación inversa.

*G. arborea* es una especie leñosa que responde a la fertilización química, pero esta puede ser sustituida hasta un 75% sin que se afecten los indicadores de crecimiento en la etapa de vivero.

En el campo, *G. arborea* compite con éxito por espacio con *B. pertusa*, aunque puede haber una reducción del forraje debido a la interceptación de RAFA en el dosel, lo cual afecta la producción de materia seca bajo el dosel; no obstante, la materia seca del estrato rasante disminuida puede ser compensada con la materia seca por lámina foliar producida por *G. arborea*.

## Referencias

- Amri, M., Rjeibi, M. R., Gatrouni, M., Mateus, D.M.R., Asses, N., Pinho, H.J.O., & Abbes, C. (2023). Isolation, Identification, and Characterization of Phosphate-Solubilizing Bacteria from Tunisian Soils. *Microorganisms*, 11(3), 783. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11030783>
- AOAC. (1965). Official Methods of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists. AOAC, Washington DC.

- Arnáez Serrano, E. & Ortiz Vargas, R. (2010). Estudio radicular de *Vochysia ferruginea* (botarrama) en plantaciones y condiciones naturales en Costa Rica. *Tecnología en marcha*, 23 (1), 9-18.
- Asea, P.; Kucey, R.; Stewart, J. (1988). Inorganic phosphate solubilization by two *Penicillium* species in solution culture and soil. *Soil Biol. Biochem.* 20, 459-464
- Badillo, B. (2018) Análisis de hojas de *Gmelina arborea* y actividad enzimática de bacterias ruminales adheridas a partículas de alimento. [Tesis doctoral]. Colpos.
- Banerjee S. & Van der Heijden M.G.A. (2023). Soil microbiomes and one health. *Nat Rev Microbiol*, 21(1), 6-20. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00779-w>. Epub 2022 Aug 23. PMID: 35999468.
- Bucheli, P; Benjamin, T.; Rusch, G., Ibrahim, M., Casals, P. Sanchez, D & Pugnaire, F. (2013). Estrategias de los árboles para el uso eficiente del agua y tolerancia a la sequía en sistemas silvopastoriles. *Agroforestería en las Américas*, 50 (1), 53-84.
- Casanova-Lugo, F., Villanueva-López, G., Alcudia-Aguilar, A., Nahed-Toral, J., Medrano-Pérez, O.R., Jiménez-Ferrer, G., Alayón-Gamboa, J.A. & Raj Aryal, D. (2022). Effect of Tree Shade on the Yield of *Brachiaria brizantha* Grass in Tropical Livestock Production Systems in Mexico. *Rangeland Ecology & Management*, 80 (1), 31-38.
- Díaz, S.M. (2019). Patrones de distribución de raíces finas en plantaciones forestales de *Eucalyptus pellita* F. Muell. sometidos a distintos esquemas de fertilización con potasio, calcio y fósforo en Puerto López (Meta). [Tesis de Maestría]. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Domínguez Palacio, D., Pozo Gálvez, C., & León Sánchez, M.A. (2018). Estimación de la densidad volumétrica y porosidad total usando el penetrómetro. *Cultivos Tropicales*, 39 (4), 34-41 2018 <https://www.redalyc.org/journal/1932/193260659005/html/>
- Donoso S., Ruiz F. & Herrera M. (2002). Distribución y cantidad de biomasa de raíces finas en plantaciones clonales de *Eucalyptus globulus*. *Ciencias Forestales* 16 (1-2). [http://www.revistacienciasforestales.uchile.cl/2001-2002\\_vol16-17/n1-2a1.pdf](http://www.revistacienciasforestales.uchile.cl/2001-2002_vol16-17/n1-2a1.pdf)

- Durang, W., Uribe, L, Henríquez, C, & Mata, R. (2015). Respiración, Biomasa Microbiana y Actividad Fosfatasa del Suelo en Dos Agroecosistemas y un Bosque en Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 39(1), 37-46. [http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0377-94242015000100003&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242015000100003&lng=en&tlng=es).
- Gándara L., Pereira MM. & Stup M. (2019). A preliminary study of spatial distribution and plant density in a leucaena-grass planting in north Corrientes, Argentina. *Tropical Grasslands-Forrajes Tropicales* 7, 143–145. doi: 10.17138/TGFT(7)143-145.
- Guillermo-Ramírez, J. (2017). Desarrollo en etapa de vivero de *Gmelina arborea* Roxb. ex Sm sometida a tres dosis de fertilización y dos sustratos. *Cultivos Tropicales*, 38(2), 47-52. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362017000200006&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362017000200006&lng=es&tlng=es).
- Gupta A, Singh UB, Sahu PK, Paul S, Kumar A, Malviya D, Singh S, Kuppusamy P, Singh P, Paul D, Rai JP, Singh HV, Manna MC, Crusberg TC, Kumar A & Saxena AK. (2022). Linking Soil Microbial Diversity to Modern Agriculture Practices: A Review. *Int J Environ Res Public Health*. 19(5), 3141. doi: 10.3390/ijerph19053141. PMID: 35270832; PMCID: PMC8910389.
- Hartmann, M., & Six, J. (2023). Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nat Rev Earth Environ*, 4, 4–18. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00366-w>.
- Hermans SM, Lear G, Case BS & Buckley HL. (2023). The soil microbiome: An essential, but neglected, component of regenerative agroecosystems. *iScience*, 26(2), 106028. doi: 10.1016/j.isci.2023.106028. PMID: 36844455; PMCID: PMC9947323.
- Hernández, W. & Salas, E. (2009). La inoculación con *Glomus fasciculatum* en el crecimiento de cuatro especies forestales en vivero y campo. *Agronomía Costarricense*, 33(1). <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6732>.
- Hernández Castro, W., Badilla Valverde, Y., Esquivel Segura, E. & Murillo Gamboa, O. (2021). Comportamiento de clones de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones de suelo ácidos. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(2), 229-249. <https://doi.org/10.15359/rca.55-2.11>

- Holdridge, L., Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA) & Jiménez Saa, H. (1977). *Ecología basada en zonas de vida*. <https://hdl.handle.net/11324/7936>.
- Hunt, R., Causton, D.R. Shipley, B. & Askew, P. (2002). A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of botany*, 90: 485-488.
- IGAC. (1990). *Manual de métodos analíticos de laboratorio de suelos*. Subdirección agrológica. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Illmer, P. & Schinner, F. (1995). Solubilization of inorganic calcium phosphates—Solubilization mechanisms. *Soil Biol. Biochem*, 27, 257–263.
- Jiang, H., Bai, Y., Du, H., Hu, Y., Rao, Y., Chen, C., & Cai, Y. (2016). The spatial and seasonal variation characteristics of fine roots in different plant configuration modes in new reclamation saline soil of humid climate in China. *Ecological Engineering*, 86, 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.020>
- Kaleeswari, R.K. (2015) Assessment of Biological Efficiency of Silviculture. *Systems Madras Agric. J.*, 102 (10-12), 386-389. <https://doi.org/10.29321/MAJ.10.001140>.
- Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal*, 112(5), 3265-3277.
- Lardy, J. M., DeSutter, T.M., Daigh, A. L. M., Meehan, M. A., & Staricka, J. A. (2022). Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance. *Agricultural & Environmental Letters*, 7, e20096. <https://doi.org/10.1002/ael2.20096>.
- Lauber CL, Strickland MS, Bradford MA, & Fierer N. (2008). The influence of soil properties on the structure of bacterial and fungal communities across land-use types. *Soil Biol Biochem*, 40, 2407-2415. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.021>.
- Maitra, S., Hossain, A., Brestic, M., Skalicky, M., Ondrisik, P., Gitari, H., Brahmachari, K., Shankar, T., Bhadra, P., Palai, J. B., Jena, J., Bhattacharya, U., Duvvada, S. K., Lalichetti, S., & Sairam, M. (2021). Intercropping—A Low Input Agricultural Strategy for Food and Environmental Security. *Agronomy*, 11(2), 343. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020343>.

- Melgarejo, L., Romero, M., Hernández, S., Barrera, J., Solarte, M., Suárez, D., Pérez, L., Rojas, A., Cruz, M., Moreno, L., Crespo, S & Pérez, W. (2010). *Experimentos en fisiología vegetal*. Universidad Nacional de Colombia.
- METER. (2024). *The researcher's complete guide to Leaf Area Index (LAI)*. <https://metergroup.com/education-guides/the-researchers-complete-guide-to-leaf-area-index-lai/>.
- Mohan, V., Saranya Devi, K. & Santhiya, M. (2018). *Gmelina arborea* rhizomicrobiome as potential plant growth promoter and antagonistic agent against *Fusarium oxysporum*. *J. Acad. Indus. Res*, 6, 207-212.
- Mora, E.R. & Manosalva, C.V. (2018). Impacto de la fertilización mineral y enmiendas sobre *Gmelina arborea* y *Schizolobium parahyba* en suelos andesíticos de la Amazonía Ecuatoriana. *Centro Agrícola*, 45(4), 49-58. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0253-57852018000400049&lng=pt&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852018000400049&lng=pt&tlng=es).
- Nambiar, E. K. S. (1983). Root development and configuration in intensively managed radiata pine plantations. *Plant and Soil*, 71, 37-47.
- Naqqash, T., Malik, K. A., Imran, A., Hameed, S., Shahid, M., Hanif, M. K., Majeed, A., Iqbal, M. J., Qaisrani, M. M., & van Elsas, J. D. (2022). Inoculation With *Azospirillum* spp. Acts as the Liming Source for Improving Growth and Nitrogen Use Efficiency of Potato. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1-16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.929114>.
- Obrador, J.J., Moreno, G., Mosquera-Losada, M.R., Rigueiro-Rodríguez, A., & Mcadam, J.H. (2004). *Soil nutrient status and forage yield at varying distances from trees in four dehesas in Extremadura, Spain*.
- Pachas, A. N. A., Shelton, H. M., Lambrides, C. J., Dalzell, S. A. & Murtagh, G. J. (2018). Effect of tree density on competition between *Leucaena leucocephala* and *Chloris gayana* using a Nelder wheel trial. I. Above ground interactions. *Crop and Pasture Science*, 69, 419-429.
- Pakos, P.V., (2012). Comportamiento y manejo de *Gmelina arborea* Roxb., en Zamorano Honduras. [Trabajo de grado].
- Piñeros Varón, R, Guevara Muñetón, L.P. y Almarío Leiva, G.A. (2019). *Indicadores de salud en el continuum suelos – pasturas*. Universidad del Tolima.

- Radhakrishnan, S. & Varadharajan, M. (2016). Status of microbial diversity in agroforestry systems in Tamil Nadu, India. *J Basic Microbiol*, 56(6), 662-9. doi: 10.1002/jobm.201500639. Epub 2016 Feb 29. PMID: 26924716.
- Ramírez-Gil, J. G. (2019). Dependency, colonization, and growth in *Gmelina arborea* inoculated with five strains of Arbuscular Mycorrhizal Fungi. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 72(2), 8775-8783. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v72n2.74691>.
- Ramírez, M., Serralde, D., Roveda, G., Rosero, A., Rivedo, S., Baquero, C., & Pérez, D. (2011). Manual de uso y aplicación de hongos formadores de micorrizas arbusculares en especies forestales. Corpoica.
- Ramírez, R. & Salazar, C. (2012). Cambios de la resistencia a la penetración en un suelo con diferentes sistemas de manejo y su relación con algunas propiedades físicas en un andisol-Marinilla La Montañita. *Ciencia, Docencia y Tecnología*, 27 (52), 481-506.
- Rosati, A.; Marchionni, D., Mantovani, D., Ponti, L. & Famiani, F. (2021) Intercepted Photosynthetically Active Radiation (PAR) and Spatial and Temporal Distribution of Transmitted PAR under High-Density and Super High-Density Olive Orchards. *Agriculture*, 11, 351. <https://doi.org/10.3390/agriculture11040351>
- Suleimanova, A., Bulmakova, D., Sokolnikova, L., Egorova, E., Itkina, D., Kuzminova, O., Gizatullina, A. & Sharipova, M. (2023). Phosphate Solubilization and Plant Growth Promotion by *Pantoea brenneri* Soil Isolates. *Microorganisms*, 11(5), 1136. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11051136>
- Son, H. J.; Park, G.-T.; Cha, M.-S., & Heo, M.-S. (2006) Solubilization of insoluble inorganic phosphates by a novel salt- and pH-tolerant *Pantoea agglomerans* R-42 isolated from soybean rhizosphere. *Bioresour. Technol.*, 97, 204-210.
- Sun, D.B. & Wang, Q.S. (2018) Linear Relationships between Photosynthetic Rate and Photochemical Energy Expressed by  $PAR \times F_v/F_m$ . *American Journal of Plant Sciences*, 9, 125-138.
- Swamy, S.L. & Mishra, A. (2014). Comparison of Biomass and C Storage in Three Promising Fast Growing Tree Plantations under Agroforestry System in Sub-humid Tropics of Chhattisgarh, *India Universal Journal*

of *Agricultural Research* 2(8): 284-296, <https://doi.org/10.13189/ujar.2014.020802>

- Swamy, S.L., Mishra, A., & Puri, S. (2003). Biomass production and root distribution of *Gmelina arborea* under an agrisilviculture system in sub-humid tropics of Central India. *New Forests*, 26: 167-186.
- Tamang M, Chettri R, Vineeta, Shukla G, Bhat JA, Kumar A, Kumar M, Suryawanshi A, Cabral-Pinto M, & Chakravarty S. (2021). Stand Structure, Biomass and Carbon Storage in *Gmelina arborea* Plantation at Agricultural Landscape in Foothills of Eastern Himalayas. *Land*. 10(4), 387. <https://doi.org/10.3390/land10040387>.
- Timofeeva, Anna, Maria Galyamova, & Sergey Sedykh. (2022). Prospects for Using Phosphate-Solubilizing Microorganisms as Natural Fertilizers in Agriculture. *Plants* 11(16), 2119. <https://doi.org/10.3390/plants11162119>.
- Torres, L.L., Aragon, L.V., & Parra, A.S. (2009). Efecto de la acacia (*Acacia decurrens*) en el desarrollo y producción del pasto aubade (*Lolium multiflorum*, Lam), Botana, departamento de Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*. 26 (1), 25-45.
- Valverde, JC, Méndez, D, & Arias, D. (2020). Efectos del defoliador *Atta cephalotes* Linnaeus. en el crecimiento y el desarrollo fisiológico e hidráulico de árboles juveniles de *Gmelina arborea* Roxb. en condiciones controladas. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(170), 214-226. Epub June 15, 2021. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1030>
- Vance, E.D., Brookes, P.C., & Jenkinson, D.S. (1987). An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 19,703-707. doi:10.1016%2F0038-0717(87)90052-6.
- Weiss, M. Baret, F. Smith, G.J. Jonckheere, I. & Coppin, P. (2004). Review of methods for *in situ* leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 121 (1-2), 37-53.
- Zambrano, J. A., & Díaz, L. A. (2008). Efecto de la inoculación de *Azospirillum brasilense* y *Glomus* sp. en *Gmelina arborea* durante su germinación y manejo en vivero. *Universitas Scientiarum*, 13(2), 162-170. <http://>

[www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-74832008000200007&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-74832008000200007&lng=en&tlng=es).

Zheng, B. X., Zhang, D. P., Wang, Y., Hao, X. L., Wadaan, M. A. M., Hozzein, W. N., Peñuelas, J., Zhu, Y. G., & Yang, X. R. (2019). Responses to soil pH gradients of inorganic phosphate solubilizing bacteria community. *Scientific reports*, 9(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37003-w>