

# Efecto de biochar, micorrizas arbusculares y *Guazuma ulmifolia*, en la rehabilitación de suelos mineros

## Biochar effect, mycorrhizae and *Guazuma ulmifolia*, in early mining soil rehabilitation stages

Laura Janeth Quiroz-Mojica<sup>1‡</sup>, María Margarita Daza-Mendoza<sup>1</sup>, Luis Carlos Díaz-Muegue<sup>1</sup>, Aslenis Emidia Melo-Rios<sup>1</sup> y Gustavo Antonio Peñuela-Mesa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Energías Ambiente y Biotecnología (GEAB), Facultad de Ingeniería y Tecnología. Universidad Popular del Cesar, Valledupar. Diagonal 21 No. 29-56 Barrio Sabanas del Valle. Valledupar, Cesar, Colombia.

<sup>‡</sup> Autora para correspondencia (lauraquiroz195@hotmail.com)

<sup>2</sup> Grupo de Investigación GDCON, Facultad de Ingeniería, Sede de Investigación Universitaria (SIU), Universidad de Antioquia. Calle 67 No. 53-108. BL.18 - Of.141. Medellín, Colombia.

### RESUMEN

La minería de carbón es una de las actividades predominantes en el departamento del Cesar, Colombia; esta impulsa el crecimiento económico del país. Después del proceso de extracción del mineral, suele utilizarse capas de suelos acopiados y material estéril para formar suelos artificiales, también llamados suelos mineros; estos, por sus condiciones edáficas poseen cierto grado de toxicidad e infertilidad, que restringe el crecimiento y la supervivencia de los organismos en el medio, dando lugar a la formación de áreas desérticas. La rehabilitación de suelos mineros fomenta el restablecimiento de las condiciones adecuadas, permitiéndole a este ofrecer nuevamente algunos bienes y servicios ambientales. El objetivo fue evaluar el efecto del biochar, los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) y NPK en la rehabilitación de suelos mineros, y en el crecimiento de la plántula *Guazuma ulmifolia* a partir de tres ensayos. Inicialmente se hizo un ensayo de germinación, utilizando semillas de *Guazuma ulmifolia*, suelos mineros y biochar en concentraciones del 0, 1, 5 y 10%; luego se estableció un ensayo a escala vivero en donde se aplicaron cuatro tratamientos que contenían a la plántula, biochar, HMA y NPK, posteriormente se realizó un ensayo a escala campo utilizando cuatro tratamientos

con la plántula, biochar y HMA. Los resultados muestran que el biochar en concentraciones de 1 y 5% incrementó significativamente el porcentaje de germinación, la longitud foliar y biomasa de las plantas; además, se halló un porcentaje de infección del 60% en las raíces de la planta por HMA; así mismo, hubo un aumento importante de pH, fósforo, carbono orgánico, glomalina y actividad enzimática en los suelos, también una reducción significativa en la conductividad eléctrica. El uso de biochar y micorrizas mejoró las propiedades de los suelos y estimuló un mayor crecimiento en la plántula, promoviendo así el proceso de rehabilitación.

**Palabras claves:** biocarbón, estériles mineros, hongos formadores de micorrizas, plantas nativas, Tecnosol.

### SUMMARY

Coal mining is one of the predominant activities in the department of Cesar, Colombia, and drives the country's economic growth. After the mineral extraction process, layers of collected soils and sterile material are usually used to form artificial soils, also called mining soils; these, due to their edaphic conditions, possess a certain toxicity and infertility degree, which restricts the growth and survival of organisms in the environment, leading to the formation

#### Cita recomendada:

Quiroz-Mojica, L. J., Daza-Mendoza, M. M., Díaz-Muegue, L. C., Melo-Rios, A. E y Peñuela-Mesa, G. A. (2021). Efecto de biochar, micorrizas arbusculares y *Guazuma ulmifolia*, en la rehabilitación de suelos mineros. *Terra Latinoamericana* 39: 1-16. e709. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.709>

Recibido: 17 de diciembre de 2019. Aceptado: 27 de noviembre de 2020.  
Artículo. Volumen 39, abril de 2021.

of desert areas. Mining soil rehabilitation encourages the restoration of adequate conditions, allowing it to once more, offer some environmental goods and services. In this study, the objective was to evaluate the biochar, arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and NPK effect on the rehabilitation of mining soils, and on *Guazuma ulmifolia* seedling growth which were evaluated from three trials: initially a germination trial was carried out, using *Guazuma ulmifolia* seeds, mining soils and biochar in concentrations of 0, 1, 5 and 10%; Then, a nursery scale trial was established where four treatments containing the seedling, biochar, AMF and NPK were applied. Later, a field scale trial was carried out using four treatments with the seedling, biochar and AMF. Results show that biochar in concentrations of 1 and 5% significantly increased the germination percentage, leaf length and plant biomass; in addition, a 60% infection rate was found in plant roots by AMF; likewise, there was a significant increase in pH, phosphorus, organic carbon, glomalin and enzymatic activity in soils, also as well as a significant reduction in electrical conductivity. The use of biochar and mycorrhizae improved the properties of the soils and stimulated growth in the seedling, thus promoting the rehabilitation process.

**Index words:** *biocarbon, mining soils, mycorrhizal fungi, native plants, Technosol.*

## INTRODUCCIÓN

Colombia es un país exportador de carbón de importancia mundial, posee el 0.8% de las reservas mundiales de carbón, ubicándose en el cuarto puesto de los países con mayor exportación en el mercado (UPME-MinMinas, 2012). Con una producción anual cercana a los 85 millones de toneladas, el carbón se constituye como el producto minero que genera un mayor aporte al producto interno bruto (PIB) del país. El 90% del carbón producido en la región proviene de las zonas mineras de los departamentos de La Guajira y el Cesar (ANM, 2013).

La minería de carbón a cielo abierto implica eliminar completamente la vegetación y el suelo de un área para la extracción de minerales, impactando fuertemente en el suelo, el agua y la biodiversidad (Domínguez *et al.*, 2018). En el departamento del

Cesar, la minería de carbón degrada una gran variedad de hábitats de especies endémicas como lo son el bosque seco espinoso y bosque seco tropical; la pérdida de este último es de gran preocupación, debido a que en el país solo queda el 8% de los 9 millones de hectáreas de bosque seco original, en consecuencia, el 65% de las tierras que han sido deforestadas presentan desertificación (Humboldt, 2014). En el departamento, el 69% de los suelos padecen de desertización, siendo la minería una de las actividades que contribuyen a la formación de esta problemática (Minambiente, 2005; Pizano y García, 2014).

El material edáfico que queda tras la explotación minera, contiene todo tipo de materiales residuales, estériles mineros, entre otros. Sus características más notables son la ausencia o baja presencia de la estructura edáfica, propiedades químicas anómalas, disminución o desequilibrio en el contenido de nutrientes, ruptura de los ciclos biogeoquímicos, presencia de compuestos tóxicos, dificultad de enraizamiento, alteración en las comunidades de macros y microorganismos, incremento de la erosión y compactación, inestabilidad y escasa cohesión (Arranz, 2011; Asensio *et al.*, 2013; Ahirwal y Maiti, 2016; Feng *et al.*, 2019; Xiao *et al.*, 2019). Dichas propiedades, afectan el establecimiento y crecimiento natural de las plantas, la eco-restauración de tierras (Maiti, 2013). Lo anterior, conlleva a desarrollar estudios y tomar medidas que busquen promover o activar las funciones ecosistémicas en los suelos.

La rehabilitación de suelos afectados por la explotación de carbón a cielo abierto, es una actividad basada en proyectos de ingeniería, los cuales buscan la recuperación de algunos atributos del suelo, el mejoramiento del sistema hidrológico y fomentan la restauración de los ecosistemas (Díaz-Muegüe *et al.*, 2013), a través de la interacción entre la vegetación y el suelo (Arranz, 2015); considerando que las plantas son bioacumuladores eficientes que pueden agregar material orgánico al suelo, y están asociadas con una gran cantidad y diversidad de organismos del suelo (Zhao *et al.*, 2013). El proceso de recuperación de zonas degradadas no es un problema fácil de resolver, ya que requiere no sólo el lograr una producción masiva de plantas sino un establecimiento exitoso. Una estrategia de restauración, pudiera ser la revegetación del área con plantas nativas, mediante plantaciones directa, para lo cual es necesario conocer los requisitos

de germinación y establecimiento de tales especies (Contreras, 2015<sup>1</sup>).

En suelos degradados, el trasplante de árboles mejora las propiedades de los suelos, producto de las actividades del sistema de raíces y los exudados de la raíz (Massaccesi *et al.*, 2015). *Guazuma ulmifolia* es un árbol nativo y pionero de América tropical, se encuentra frecuentemente en vegetación secundaria derivada de bosques tropicales perennifolios. Su efecto restaurador contribuye en la conservación de los suelos, fijación de nitrógeno y cobertura de hojarasca. Sus características fisiológicas le permiten ser de fácil adaptación, rápido crecimiento, y además muestra un potencial significativo para la reforestación productiva en zonas degradadas de selvas y en zonas secas o áridas (Lamarck, 1789). Se informó que el uso del árbol en conjunto de fertilizantes orgánicos y hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA), apoyo la recuperación áreas afectadas por minerías (Souza *et al.*, 2012).

Por otro lado, los HMA pueden promover la restauración ecológica de áreas afectadas por la minería, mediante la adquisición de minerales y la tolerancia al estrés hídrico o biótico de las plantas, contribuir a la estructura y calidad del suelo y ayudar a mantener la estabilidad y el funcionamiento del ecosistema (Zhao *et al.*, 2015; Wang, 2017; Pavithra y Yapa, 2018). Además, son capaces de establecer simbiosis con al menos el 80% de las especies vegetales (Brundrett, 2009). Así mismo se plantea, que HMA ayudan a reducir los daños causados por erosión y a mantener la estructura del suelo, mediante la producción de micelio y sustancias adherentes (Lozano Sánchez *et al.*, 2015) como la glomalina, esta última, favorece la formación de agregados, retención de materia orgánica y captura de carbono en el suelo (Plaza *et al.*, 2013; Nautiyal *et al.*, 2019).

El uso de enmiendas como el biochar puede favorecer la adaptación y supervivencia de la vegetación y los microorganismos en el proceso de rehabilitación de suelos, debido a los efectos positivos que produce en las características del suelo. El biochar o biocarbón, es el producto de la transformación térmica de materiales orgánicos (biomasa) con escaso o limitado suministro de oxígeno a temperaturas relativamente bajas, inferiores a los 700 °C (Escalante

*et al.*, 2016). Se ha reportado que el biochar mejora las características fisicoquímicas del suelo, al reducir la densidad aparente, aumentar la porosidad, pH, carbono orgánico soluble, nitrógeno total, relación carbono: nitrógeno, fósforo disponible y potasio, además ayuda al secuestro de carbono (Escalante *et al.*, 2016; Xiao *et al.*, 2016); también incrementó la retención de humedad e infiltración del agua en suelo, proporcionando nutrientes y agregando carbono lábil en suelos altamente meteorizados (Trippe *et al.*, 2015). Así mismo, se indicó que el biochar incrementó la germinación y longitud de la raíz en *Brachiaria decumbens*, redujo la concentración de sales, y ayudó a corregir la acidez de suelos afectados por la minería de carbón en Colombia (Díaz-Muegue *et al.*, 2017).

El objetivo de esta investigación, fue evaluar el efecto de *Guazuma ulmifolia*, los hongos formadores de micorrizas arbusculares y el biochar producido a partir de cuesco de palma *Elaeis guineensis*, en las fases tempranas de rehabilitación de dos tipos de suelos disturbados por actividad minera, en cuanto a indicadores fisicoquímicos y microbiológicos de suelos, además del crecimiento de la planta.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de Estudio

El departamento del Cesar se encuentra ubicado en el noreste de Colombia, en la llanura del Caribe, localizado entre los 07° 41' 16" y 10° 52' 14" N y 72° 53' 27" y 74° 08' 28" O del meridiano de Greenwich. Limita al norte con los departamentos de La Guajira y Magdalena; al sur con los departamentos de Bolívar y Norte de Santander, y al oriente con Norte de Santander y la república de Venezuela. Los suelos del departamento del Cesar, se caracterizan por ser superficiales o moderadamente profundos y pobremente drenados, de reacción fuertemente ácida y moderadamente alcalina, fertilidad natural baja y moderada (IGAC y CORPOCESAR, 2018).

El área específica de estudio hace parte del corredor minero del Cesar, en el corregimiento de la Loma, jurisdicción del municipio del Paso, ubicado en el centro-occidente del departamento. Presenta un clima cálido seco, la temperatura media anual es de

<sup>1</sup> Contreras-Quiroz, M. R. 2015. Germinación de semillas de especies nativas de los pastizales del altiplano del norte de México. Tesis de maestría en Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, Nuevo León, México. Pp. 65. URI: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/2683>.

28.5 °C, en esta zona se registran los mayores déficits de lluvia, la precipitación promedio anual oscila entre 1000-1500 mm, siendo los meses más críticos entre diciembre y marzo. El ecosistema presente es el bosque seco tropical, la evapotranspiración total anual oscila entre 1700-1900 mm. Entre las especies forestales predominante de la zona se encuentran: *Himenaea coubaril*, *Guazuma ulmifolia*, *Gliricidia sepium*, *Ceiba pentandra*, *Crescentia cujete*, entre otras (Hernández, 2003).

### Caracterización Inicial de los Suelos Mineros

Se seleccionaron cinco puntos de muestreo aplicando un criterio de selección a juicio recomendado por Barahona e Iriarte (2001), en dos tipos de suelos mineros que se encuentran en las fases tempranas del proceso de rehabilitación. El primero es un suelo acopiado, de tipo entisol (Lithic Trophents) con compuestos ferrosos (IGAC, 1997; Hernández, 2003), el cual fue removido y acopiado en las etapas iniciales de la explotación de carbón, el segundo es un Tecnosol con plintitas (Hernández, 2003), formado a partir de la descomposición del material estéril. Las muestras fueron recolectadas a una profundidad máxima de 20 cm, y llevadas al laboratorio de suelo de la Facultad de Ingeniería y Tecnología de la Universidad Popular del Cesar, donde se dejaron secar a temperatura ambiente 29 °C, se molieron y tamizaron utilizando un tamiz malla 2 mm para su posterior análisis fisicoquímico y microbiológico.

Las características fisicoquímicas evaluadas en los suelos fueron las siguientes: Color en húmedo mediante el Sistema de Notación Munsell. Densidad aparente por el método de la probeta. Densidad real por el método del picnómetro de agua (2002). Textura por el método Bouyoucos (1962) para la fracción <2 mm. Capacidad de retención de humedad mediante NTC 5167 (ICONTEC, 2004). Fósforo (P) por el método de Oslen. Carbono orgánico por oxidación húmeda (Mingorance *et al.*, 2007). Capacidad de intercambio catiónico aplicando NTC 5268 (ICONTEC, 2014). El pH se determinó en 1:1 suspensión de suelo-agua usando un electrodo de pH (Orion Scientific Waltham). La conductividad eléctrica se determinó en 1:5 suspensión de suelo-agua usando un conductímetro 720 WTW (IGAC, 2008).

Las características microbiológicas evaluadas en los suelos fueron las siguientes: actividad enzimática mediante la técnica de hidrólisis del di acetato de fluoresceína (FDA) de Schnürer y Rosswall (1982). Glomalina mediante la técnica sucesivas con citrato de sodio 50 mM pH 8.0 en autoclave a 121 °C por ciclos de 60 minutos hasta desaparición del color pardo-rojizo característico con posterior determinación espectrofotométrica mediante el método Bradford para proteínas como lo proponen Wright y Upadhyaya (1996). Conteo de esporas de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) por gramo de suelo aplicando la técnica de flotación-infiltración (Gerdeman y Nicholson, 1963).

### Ensayo de Germinación

Inicialmente las semillas se sometieron a un proceso pregerminativo, el cual consistió en colocarlas en baño maría durante 5 minutos a una temperatura de 80 °C, luego se lavaron con agua de grifo y con ayuda de tela de algodón se limpiaron para eliminar la capa de mucilago presente (Hernández *et al.*, 2001). El contenido total de material (suelo + biochar) por cada caja de Petri fue 5 g, las dosis de biochar aplicadas fueron 0, 1, 5 y 10%. Por cada dosis se establecieron cinco réplicas y al mismo tiempo 10 semillas por cada réplica. El montaje tuvo una duración de 15 días. Las variables evaluadas fueron: porcentaje de germinación (%), biomasa ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), longitud foliar y radicular (cm). Se aplicó un diseño experimental completamente al azar, teniendo como variable independiente las dosis de biochar y dependiente el porcentaje de germinación, biomasa, longitud foliar y radicular.

### Ensayo a Escala Vivero

Se utilizaron plantas producidas en vivero con una longitud promedio de 18 cm y rizotrones con un área de 0.32 m<sup>2</sup> y con capacidad de 1.8 kg. Los tratamientos aplicados fueron: tratamiento 1 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g de biochar + 15 g de sustrato arenoso de micorrizas); tratamiento 2 (*Guazuma ulmifolia* + 15 g de sustrato arenoso de micorrizas); tratamiento 3 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g biochar + 15 g sustrato arenoso micorrizas + 2 g de fertilizante químico-NPK) y tratamiento 4 (*Guazuma ulmifolia*), por cada tratamiento se establecieron tres réplicas. El montaje

tuvo una duración de tres meses (90 días). Teniendo en cuenta lo anterior, en el ensayo se aplicó un diseño experimental de bloques al azar, con cuatro tratamientos y tres repeticiones.

**Evaluación del crecimiento foliar, radicular y biomasa de la plántula *Guazuma ulmifolia*.** Se realizó un seguimiento mensual al crecimiento foliar durante los tres meses ( $\text{cm día}^{-1}$ ), además se evaluó el crecimiento foliar y radicular antes y después de la plantación. Una vez culminado el ensayo, se determinó la biomasa ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) a partir del peso seco, para esto las plántulas se introdujeron al horno durante 48 horas a una temperatura de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Recuento e infección por HMA en las raíces de las plantas.** El conteo de esporas de HMA por gramo se realizó nuevamente mediante la técnica de flotación-infiltración (Gerdeman y Nicholson, 1963). El porcentaje de infección por HMA en las raíces de la plántula se determinó por el método de tinción de raíces, utilizando azul de tripano al 0.05% hasta cubrir totalmente las raíces y se calentó en el horno a  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 20 minutos (Vierheilig *et al.*, 2005). Se retiró el exceso de azul de tripano y se montó verticalmente en láminas portaobjetos de 5 a 10 raíces de 1 - 2 cm aproximadamente, posteriormente se observó en el microscopio a 10X y 40X. El cálculo del porcentaje de infección se hizo aplicando la Ecuación 1:

$$\% \text{ infección} = \frac{\text{Campos infectados}}{\text{Campos observados de la raíz}} \times 100 \quad (1)$$

**Caracterización de los suelos mineros después del ensayo en vivero.** Una vez culminado el ensayo, se realizó el análisis de los suelos aplicando los procedimientos y métodos utilizados en la caracterización inicial.

### Ensayo a Escala Campo

Se hizo *in situ* en el suelo Tecnosol que se encuentra en proceso de rehabilitación, cabe aclarar que el área en donde se instaló el ensayo difiere de los puntos de muestreo de donde se tomó el suelo para los ensayos anteriores, por lo tanto, fue necesario realizar la caracterización antes y después de la intervención. Se establecieron cuatro lotes con dimensiones de  $7 \times 45\text{ m}^2$ .

Los tratamientos aplicados fueron: lote 1 (*Guazuma ulmifolia*); lote 3 (*Guazuma ulmifolia* +  $4.3\text{ Mg ha}^{-1}$  de biochar); lote 5 (*Guazuma ulmifolia* +  $4.3\text{ Mg ha}^{-1}$  de biochar +  $5.5\text{ Mg ha}^{-1}$  de sustrato arenoso de micorrizas) y lote 8 (*Guazuma ulmifolia* +  $5.5\text{ Mg ha}^{-1}$  sustrato arenoso de micorrizas). Con base en lo anterior, en este ensayo se aplicó un diseño experimental de bloques al azar con cuatro tratamientos y cinco repeticiones.

**Crecimiento del foliar y diámetro basal de la plántula *Guazuma ulmifolia* en lotes.** Se plantaron 12 árboles por cada lote, a estas se les realizó un seguimiento en cuanto al crecimiento foliar ( $\text{cm día}^{-1}$ ) y del diámetro ( $\text{cm día}^{-1}$ ) durante seis meses.

**Caracterización del suelo Tecnosol en lotes.** La evaluación de las características de los suelos intervenidos se realizó después de 11 meses de la plantación, para esto, se establecieron cinco puntos de muestreo en el suelo rizoférico por cada lote. Las variables a evaluar fueron pH, conductividad eléctrica y fósforo.

### Origen del Biochar

El biochar se obtuvo en un horno piloto de producción con cilindro regulador de alta presión perteneciente a la Universidad Popular del Cesar, a partir de cuesco de la fruta de la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jac), mediante pirolisis lenta a una temperatura de  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  en atmósfera controlada de nitrógeno. De acuerdo a la caracterización realizada por Díaz-Muegue (2017<sup>2</sup>), el biochar presentó pH: 8.92, CE:  $0.24\text{ dS m}^{-1}$ , carbono orgánico 0.68%, densidad aparente  $0.28\text{ g cm}^{-3}$  y capacidad de intercambio catiónico:  $42.8\text{ cmol kg}^{-1}$ .

### Análisis de Datos

Las variables se sometieron a pruebas estadísticas descriptivas, como promedio y desviación estándar. Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) seguido de la prueba de Duncan ( $P \leq 0.05$ ), con el fin de comparar los tratamientos y el testigo en relación a variables fisicoquímicas y microbiológicas de los suelos y el crecimiento de la plántula *Guazuma ulmifolia*. Se utilizó el software Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 2.0.

<sup>2</sup> Díaz-Muegue, L. C. 2017. Remediación de suelos alterados por actividad de minería del carbón a cielo abierto, mediante aplicación de biochar procedente de residuos biomásicos de la palma de aceite en la zona carbonífera del departamento del Cesar. Tesis doctoral. Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia. Pp. 273. <http://hdl.handle.net/10495/9684>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización Inicial

Desde el punto de vista físico, el suelo Acopio se caracterizó por ser de color pardo rojizo oscuro (5YR -3/3), con densidad aparente y real de 1.36 y 1.92 g cm<sup>-3</sup> respectivamente, de textura franco arcillo arenosa (62.10% arena, 20.55% arcilla y 17.35% limo) y con capacidad de retención de humedad moderada (35.22%). En cuanto a las propiedades químicas, presentó pH extremadamente ácido (4.25), con capacidad de intercambio catiónico moderada (25.97 meq 100g<sup>-1</sup>), y bajas concentraciones de sales (CE = 0.08 dS m<sup>-1</sup>), fósforo (0.85 mg kg<sup>-1</sup>) y carbono orgánico (0.05%). Con relación a las propiedades microbiológicas, la densidad de esporas de HMA fue de 8 esporas/g de suelo, la concentración de glomalina total y la actividad enzimática fue 0.04 mg g<sup>-1</sup> y 8.04 mg kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> respectivamente.

Por otro lado, el suelo Tecnosol se caracterizó por ser de color pardo oscuro (10YR-4/3), con densidad aparente y real 1.51 y 2.48 g cm<sup>-3</sup> respectivamente, de textura tipo arcillosa (34.10% arena, 46.25% arcilla y 19.65% limo) y alta capacidad de retención de humedad (43.36%). Así mismo, presenta pH neutro (6.73), alta capacidad de intercambio catiónico (44.94 meq 100<sup>-1</sup>), y bajas concentraciones de sales (CE = 0.35 dS m<sup>-1</sup>), fósforo (0.72 mg kg<sup>-1</sup>) y carbono orgánico (0.04%). Con una densidad de esporas de 2 esporas/gramo de suelo, la concentración de glomalina y actividad enzimática fue 0.03 mg g<sup>-1</sup> y 10.02 mg kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

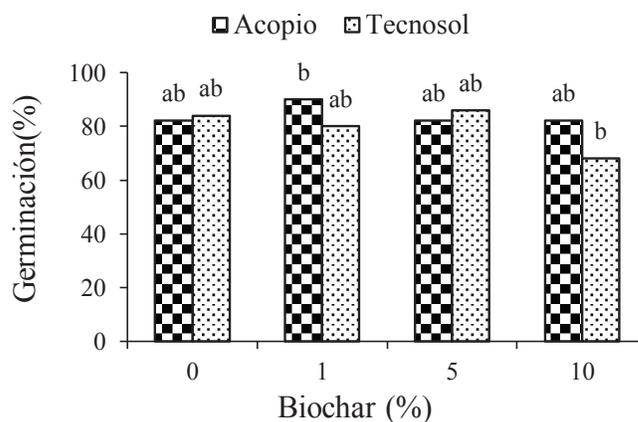
En relación a lo anterior, durante los procesos de extracción - pre minería, los suelos sufren alteraciones drásticas en sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas originales (Feng *et al.*, 2019). Se ha manifestado que en los suelos mineros la actividad microbiana es baja, consecuente de la pérdida de materia orgánica, lo cual puede afectar seriamente el contenido de nutrientes (Dorr *et al.*, 2016). Por otro lado, la acumulación y oxidación de sulfuros en los suelos mineros tiende a incrementar la acidez en el medio, promoviendo así la insuficiencia nutritiva y toxicidad química, lo cual afecta la solubilidad, concentración y movilidad de las especies iónicas en ambientes acuosos, en consecuencia, su absorción por las plantas (Malik *et al.*, 2018; Amoah *et al.*, 2020). Por su parte los tecnosoles, son diferentes de los suelos naturales debido a su estructura y función ya que la extracción

del carbón genera un alto nivel de compactación, limitando la disponibilidad de nutrientes y generando un desequilibrio en la actividad microbiana de este suelo (Feng *et al.*, 2019).

### Ensayo de Germinación

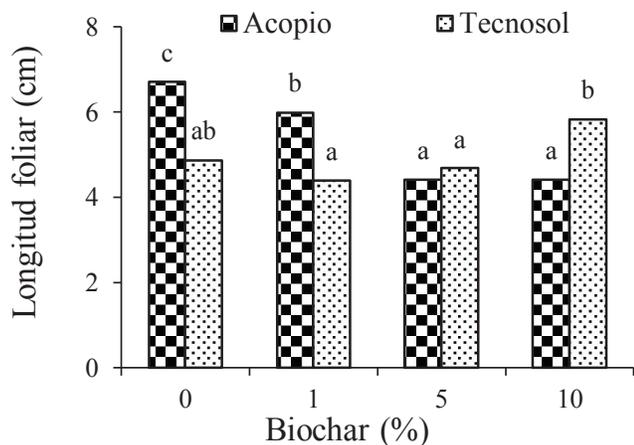
El efecto del biochar en el proceso de germinación de las semillas de *Guazuma ulmifolia* varió dependiendo de la concentración aplicada. En el suelo Acopio, el mayor porcentaje de semillas germinadas se obtuvo cuando se aplicó biochar al 1%, con un valor del 90%, hubo diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) con respecto a las demás dosis (Figura 1). Por otro lado, el porcentaje de germinación en el suelo Tecnosol disminuyó significativamente ( $P < 0.05$ ) con la aplicación de biochar al 10% (Figura 2). En cuanto al crecimiento foliar y radicular de las plántulas, con la aplicación de 0, 1 y 5% de biochar, se obtuvo mayor crecimiento, sin embargo, con una concentración del 5% de biochar hubo mayor producción de biomasa (Figuras 3 y 4).

Con base en lo anterior, resultados similares obtuvieron Shamim *et al.* (2018) al estudiar el efecto de biochar en la germinación de semillas, el crecimiento temprano de *Oryza sativa* L. y los nutrientes del suelo, se manifestó que el biochar tiene un aumento significativo en el peso seco, de los brotes en comparación con el control. Además, la enmienda en una concentración del 10% inhibió en cierto grado



**Figura 1. Efecto del biochar en la germinación de semillas de la plántula *Guazuma ulmifolia*.** Valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según Duncan 0.05.

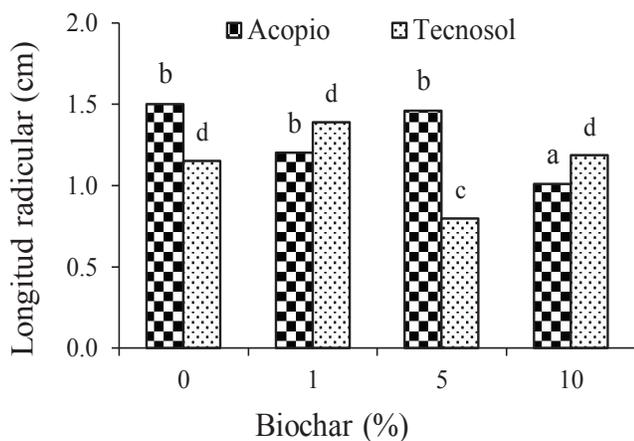
**Figure 1. Biochar effect on seed germination in *Guazuma ulmifolia* seedling.** Values followed by the same letter do not present significant differences according to Duncan 0.05.



**Figura 2.** Efecto del biochar en el crecimiento foliar de la plántula *Guazuma ulmifolia*. Valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según Duncan 0.05.

**Figure 2.** Biochar effect on foliar growth in *Guazuma ulmifolia* seedling. Values followed by the same letter do not present significant differences according to Duncan 0.05.

el porcentaje la germinación de las semillas lo que contradice a lo obtenido por Abenza (2012<sup>3</sup>), quien manifestó que la adición de las distintas enmiendas en forma de biochar al suelo no conlleva efectos inhibidores en el periodo de germinación, crecimiento



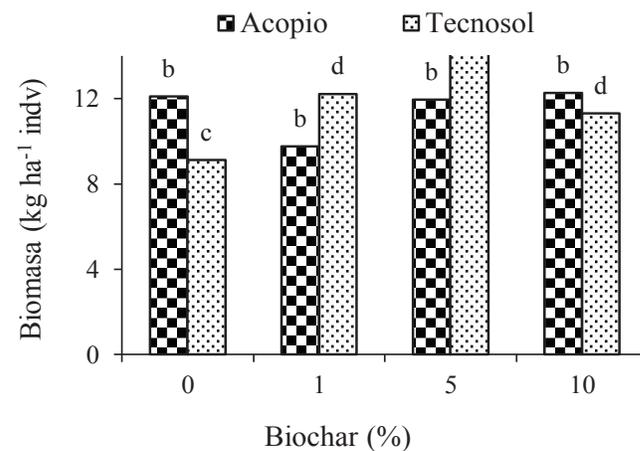
**Figura 3.** Efecto del biochar en el crecimiento radicular de la plántula *Guazuma ulmifolia*. Valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según Duncan 0.05.

**Figure 3.** Biochar effect on root growth in *Guazuma ulmifolia* seedling. Values followed by the same letter do not present significant differences according to Duncan 0.05.

y producción de la planta de *Hordeum vulgare*. A diferencia del suelo acopio, en el Tecnosol sin biochar la plántula tuvo un menor crecimiento foliar y radicular, además en biomasa, lo anterior podría ser consecuencia de la posible presencia de metales o compuestos tóxicos (Nirola *et al.*, 2016).

### Ensayo a Escala Vivero

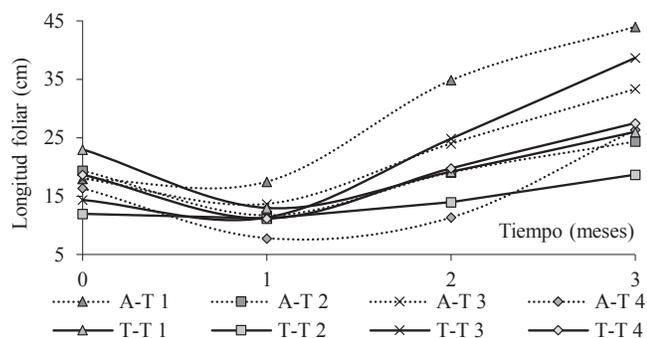
**Evaluación del crecimiento foliar, radicular y biomasa de la plántula *Guazuma ulmifolia*.** Con la aplicación de los tratamientos 1 y 3, se evidenció el mayor crecimiento foliar (Figura 5). En el suelo Acopio, la plántula logró un crecimiento de 0.3 y 0.14 cm día<sup>-1</sup>, mientras que con los tratamientos 2 y 4 creció 0.03 y 0.05 cm día<sup>-1</sup>; así mismo en el suelo Tecnosol con el tratamiento 3, el crecimiento fue 0.2 cm día<sup>-1</sup> a diferencia de los demás tratamientos en donde la máxima tasa de crecimiento fue 0.07 cm día<sup>-1</sup>. Por otro lado, el biochar y los HMA no produjeron diferencia significativa ( $P > 0.05$ ) en el crecimiento radicular de la planta. En la Figura 5, se puede observar un decrecimiento de las plantas al mes de la plantación, lo anterior pudo deberse al estrés hídrico y biótico que sufrió la planta durante el periodo de adaptación (Quintão-Scalon *et al.*, 2011), además de las condiciones edáficas de los materiales.



**Figura 4.** Efecto del biochar en la biomasa de la plántula *Guazuma ulmifolia*. Valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según Duncan 0.05.

**Figure 4.** Biochar effect on the biomass in *Guazuma ulmifolia* seedling. Values followed by the same letter do not present significant differences according to Duncan 0.05.

<sup>3</sup> Abenza, D. P. 2012. Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Trabajo de grado para obtener el título de Licenciatura en Ciencias Ambientales. Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona, España.



**Figura 5. Crecimiento foliar de la plántula *Guazuma ulmifolia* en suelos Acopio y Tecnosol.** A = Acopio; T = tecnosol; T1 = tratamiento 1 (25 g biochar+15 g de sustrato arenoso de HMA); T2 = tratamiento 2 (15 g de sustrato arenoso de HMA); T3 = tratamiento 3 (25 g biochar+15 g de inóculo de HMA+2 g NPK); T4 = tratamiento 4 (suelo).

**Figure 5. Foliar growth of the *Guazuma ulmifolia* seedling in Acopio and Tecnosol soils.** A = Acopio; T = Tecnosol; T1 = treatment 1 (25 g biochar + 15 g of sandy HMA substrate); T2 = treatment 2 (15 g of sandy HMA substrate); T3 = treatment 3 (25 g biochar + 15 g of inoculum of HMA + 2 g NPK); T4 = treatment 4 (soil).

Respecto a la biomasa, en el suelo Acopio las plantas presentaron la mayor cantidad de biomasa ( $132.6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ individuo}^{-1}$ ) con la aplicación del tratamiento 1, seguido de los tratamientos 2, 4 y 3 con cantidades de  $47.8$ ,  $41.7$  y  $37.5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ individuo}^{-1}$ . Sin embargo, en el suelo Tecnosol, la aplicación del tratamiento 3 incrementó el contenido de biomasa con  $68.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ individuo}^{-1}$ , seguido de los tratamientos 4, 1 y 2 con cantidades de  $53.3$ ,  $48.1$  y  $35.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ individuo}^{-1}$  respectivamente.

**Infección por HMA en las raíces de las plantas.** En el suelo Acopio, con la aplicación de los tratamientos 1 y 3 el porcentaje de infección fue 60%, a diferencia de los tratamientos 2 y 4 en donde solo se evidenció el 20%, mientras que en el suelo Tecnosol con la aplicación de los tratamientos 1, 2 y 3 se halló un porcentaje de infección del 20%, a diferencia del tratamiento 4 en donde no hubo micorrización. La simbiosis entre la plántula y los HMA se vio favorecida por la presencia de biochar, con la aplicación de los tratamientos 1 y 3 se observó mayor porcentaje de infección, lo cual estimuló a la plántula a obtener el máximo crecimiento y producción de biomasa. Estudios recientes demuestran, que el proceso de colonización de HMA en *Theobroma cacao* L, se vio favorecido por la presencia de biochar, así mismo el crecimiento y crecimiento del peso seco (Aggangan *et al.*, 2019). Además, la incidencia del

biochar y HMA mejoró la tolerancia al estrés hídrico (Hashem *et al.*, 2019). La micorrización de la plántula *Guazuma ulmifolia*, podría garantizar la supervivencia de la plántula en el proceso de rehabilitación, estudios observaron una mayor mortalidad de *Guazuma ulmifolia* en plántulas no inoculadas (tres plantas) y en plántulas inoculadas con la mezcla de AMF nativo (Souza *et al.*, 2012).

### Caracterización de los Suelos Mineros Después del Ensayo en Vivero

Los resultados que se presentan en los Cuadros 1, 2 y 3 fueron analizados estadísticamente, realizando una comparación entre las características iniciales de los suelos y los tratamientos mencionados en el marco metodológico. De acuerdo a lo expuesto en el Cuadro 1, en el suelo Acopio la densidad aparente se redujo significativamente ( $P < 0.05$ ) con los tratamientos 2 y 4, mientras que el suelo Tecnosol dicha propiedad se redujo significativamente ( $P < 0.05$ ) con los tratamientos 1 y 2. Se ha manifestado que la disminución en la densidad aparente de suelo por la aplicación de biochar, puede aumentar la porosidad total (Blanco, 2017), lo anterior podría favorecer la aireación y drenaje en el medio edáfico, así mismo la actividad en macro y microorganismos.

La aplicación de los tratamientos 1 y 2 generó diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en la capacidad de retención de humedad de los suelos acopio y Tecnosol, siendo el tratamiento 2 el que generó un mayor aumento. En las demás características no se encontró diferencia significativa con la aplicación de los tratamientos.

Por otra parte, la aplicación de los 4 tratamientos produjo diferencia significativa ( $P < 0.05$ ) en el pH de los suelos (Cuadro 2), en el suelo Acopio con el tratamiento 3, el pH varió desde extremadamente ácido (4.25) a moderadamente ácido (5.07) seguido a este, se encuentra los tratamientos 4, 1 y 2; mientras en el suelo Tecnosol, con el tratamiento 2 el pH se incrementó desde neutro (6.73) a medianamente alcalino (7.41). Una de las causas principales de la acidez en el suelo mineros es la presencia de metales pesado y oxidación de carbón mineral, estudios recientes han demostrado que el biochar y los HMA puede reducir la movilidad y el contenido disponible de metales como Cd, Pb y Zn, y aumentar el pH del suelo (Puga *et al.*, 2016; Meng *et al.*, 2018; Bruneel *et al.*, 2019). La modificación de

**Cuadro 1. Características físicas de los suelos después del ensayo de vivero.**  
**Table 1. Physical characteristics of soil after the nursery test.**

Suelo	Tratamiento	Color Munsell	Características físicas						
			Densidad aparente	Densidad real	Textura			Tipo	Retención humedad
			g cm <sup>-3</sup>		%				%
Acopio	1	5YR -4/3	1.31 c	1.93 ab	62.07	23.04	14.89	Fr-Arc-Ar	38.68 a
	2	5YR -4/3	1.28 c	1.93 ab	68.31	23.04	8.65	Fr-Arc-Ar	39.09 a
	3	5YR -4/3	1.31 c	1.92 a	64.8	17.9	17.3	Fr-Arc-Ar	36 ab
	4	5YR -4/3	1.23 abc	1.92 a	63.15	23.04	13.81	Fr-Arc-Ar	35.78 ab
Tecnosol	1	10YR -3/4	1.16 a	2.49 c	35.77	44.45	19.78	Arc	45.06 c
	2	10YR -3/4	1.18 ab	2.49 c	35.53	44.45	20.02	Arc	46.52 c
	3	10YR -3/4	1.26 bc	2.49 c	34.81	46.36	18.84	Arc	44.88 bc
	4	10YR -3/4	1.31 c	2.48 c	35.21	53.87	10.92	Arc	43.81 bc

Ar = arena; Arc = arcilla; L = limo. Valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según Duncan 0.05.  
 Ar = sand; Arc = clay; L = silt. Values followed by the same letter do not present significant differences according to Duncan 0.05.

pH en los suelos que solamente fueron intervenidos por la plántula *Guazuma ulmifolia* permite plantear la siguiente hipótesis: *Guazuma ulmifolia* es una especie correctora de acidez en el suelo. Lo anterior podría explicarse por la capacidad que tienen la planta para absorber metales pesados (Marrugo *et al.*, 2016), lo cual permite que disminuya su concentración en el suelo.

Por otro lado, la concentración de sales en el suelo Acopio se redujo significativamente ( $P < 0.05$ ) con el tratamiento 3, también hubo diferencia significativa con los demás tratamientos; además, los tratamientos 2 y 4 redujeron la conductividad eléctrica (CE) moderadamente. En cambio, en el suelo Tecnosol la aplicación de los tratamientos 3 y 4 la CE disminuyó desde 0.35 dS m<sup>-1</sup> a 0.27 y 0.17 dS m<sup>-1</sup> (Cuadro 2).

Los cuatro tratamientos incrementaron significativamente la concentración de fósforo en los suelos (Cuadro 2), en el suelo Acopio con los tratamientos 1 y 2 se incrementó porcentualmente en un 148 y 145.9% con respecto a la concentración inicial, mientras que con los tratamientos 3 y 4 aumentó porcentual de 128 y 87.1% respectivamente. De igual manera en el suelo Tecnosol, con el tratamiento 1 hubo un incremento porcentualmente de 208.3% con respecto a la concentración inicial, seguido a este se encuentra los tratamientos 3, 4 y 2. Con respecto a lo anterior,

se ha manifestado que el biochar libera lentamente fósforo en el suelo, además, la presencia de HMA en el suelo rizoférico tiende a aumentar la disponibilidad de este en las raíces de las plantas (Zwetsloot *et al.*, 2016). Los HFM solubilizan fósforo en conjuntos con bacterias solubilizadoras de fosfato, incrementando la disponibilidad de fósforo en el suelo (Taktek *et al.*, 2015 y 2017).

Por otra parte, la concentración de carbono orgánico aumentó con los tratamientos 1, 2 y 4 en el suelo Acopio, en concentraciones de 0.75 y 0.92%, mientras que en el suelo Tecnosol con los tratamientos 1 y 4 la concentración de carbono se incrementó 0.35 y 0.83%. Se informó que la aplicación de biochar al suelo aumenta significativamente el contenido de C total hasta el 68.8% (Laird *et al.*, 2010). En nuestro caso la concentración de carbono por unidad en un 0.91%, dicho incremento podría estar relacionado con la composición química de la enmienda (0.86%), además de la capacidad para capturar CO<sub>2</sub> y la acumulación de carbono en fracciones de agregado (Zhang *et al.*, 2015; Jung *et al.*, 2019), también con las actividades metabólicas de la planta y los microorganismos, sabiendo que en la simbiosis los HMA excretan sustancias como la glomalina, la cual tiene una estrecha relación con el carbono orgánico soluble (Seguel *et al.*, 2008).

**Cuadro 2. Características químicas de los suelos después del ensayo de vivero.**  
**Table 2. Chemical characteristics of soil after the nursery test.**

Características químicas						
Suelos	Tratamientos	pH	Conductividad eléctrica	Capacidad de intercambio catiónico	Fósforo	Carbono orgánico
		H <sup>+</sup>	dS m <sup>-1</sup>	meq 100 g <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	%
Acopio	1	4.64 a	0.04 a	19.19 a	2.11 c	0.88 d
	2	4.73 a	0.02 a	16.87 a	2.09 c	0.97 d
	3	5.07 b	0.02 a	19.82 a	1.94 b	0.34 c
	4	4.82 a	0.02 a	25.62 a	1.59 ab	0.88 d
Tecnosol	1	6.96 c	0.30 c	22.72 a	2.22 c	0.39 c
	2	7.41 d	0.27 c	23.33 a	1.07 a	0.07 ab
	3	6.99 c	0.17 b	23.38 a	1.82 b	0.12 ab
	4	6.94 c	0.12 b	26.4 a	1.22 ab	0.87 d

Tratamiento 1 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g de biochar + 15 g de sustrato arenoso de micorrizas); tratamiento 2 (*Guazuma ulmifolia* + 15 g de sustrato arenoso de micorrizas); tratamiento 3 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g biochar + 15 g sustrato arenoso micorrizas + 2 g de fertilizante químico-NPK); tratamiento 4 (*Guazuma ulmifolia*). Valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según Duncan 0.05.

Treatment 1 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g of biochar + 15 g of sandy mycorrhizal substrate); treatment 2 (*Guazuma ulmifolia* + 15 g of sandy mycorrhizal substrate); treatment 3 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g biochar + 15 g mycorrhizal sandy substrate + 2 g of chemical fertilizer-NPK); treatment 4 (*Guazuma ulmifolia*). Values followed by the same letter do not present significant differences according to Duncan 0.05.

De acuerdo al Cuadro 3, la concentración de glomalina en el suelo Acopio se elevó significativamente con la aplicación del tratamiento 3, con un incremento porcentual de 100%, mientras que con los tratamientos el incremento fue de 1, 2 y 4 se incrementó hasta 75%; así mismo, en el suelo Tecnosol con los tratamientos 2 y 4 se incrementó en un 100% respecto al valor inicial, en cambio con los tratamientos 2, 3 y 4 la concentración se elevó en un 100%. La presencia de biochar mejora la micorrización, causando una mayor producción de glomalina y estimulación de exudados de la raíz, lo que puede modificar la C residual del suelo y mejorar la actividad microbiana. Los filamentos fúngicos y sus productos metabólicos también son agentes aglutinantes en los niveles meso y macro agregados del suelo (Carbone-Carneiro *et al.*, 2015; Amoah *et al.*, 2020), repercutiendo así en el incremento de la capacidad de retención de humedad y drenaje, reducción del nivel de erosión y lixiviación de nutrientes.

Por otro lado, la actividad enzimática en el Acopio se incrementó significativamente ( $P < 0.05$ ) en todos los tratamientos en el suelo acopio, sobresaliendo los tratamientos 3 y 4. En el suelo Tecnosol,

con los tratamientos 1 y 2 hubo la mayor variación desde 10.02 mg kg ha<sup>-1</sup> a 41.75 y 37.91 mg kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup>, de igual forma con los tratamientos 3 y 4 los niveles se acrecentaron hasta 31.57 y 31.44 mg kg<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> con respecto al valor inicial. El aumento de la actividad enzimática, es un indicador del incremento del carbono orgánico, fósforo y la multiplicación de los microorganismos en los suelos. Trupiano *et al.* (2017), notaron un incremento de material vegetal por acción del biochar en el cultivo de lechuga en macetas, dichos autores manifestaron que la actividad de las enzimas relacionadas con los ciclos de nitrógeno, fósforo y carbono mejoraron con la aplicación de la enmienda; mejorando disponibilidad de estos elementos para las plantas y al mismo tiempo incrementando la capacidad de retención de humedad en el suelo.

### Ensayo en Campo

**Crecimiento foliar y diámetro basal de la plántula *Guazuma ulmifolia* en lotes.** Bajo las condiciones de estrés hídrico y la deficiencia de nutrientes en que la planta se encontraba, se evidencia (Figura 6) un mejor crecimiento cuando se le aplicó biochar y micorrizas, en el lote 5 la planta tuvo una tasa de crecimiento

**Cuadro 3. Características microbiológicas de los suelos después del ensayo de vivero.**  
**Table 3. Microbiological characteristics of soil after the nursery test.**

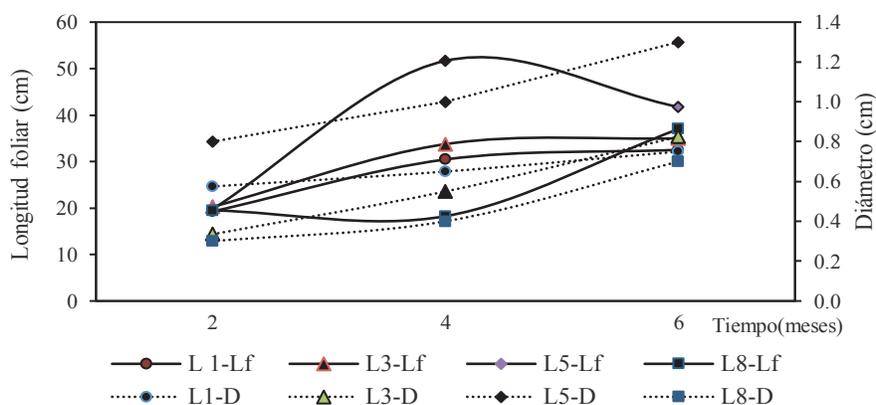
Suelo	Tratamiento	Características microbiológicas		
		Esporas de HMA	Glomalina total	Actividad enzimática
		Esporas g <sup>-1</sup>	mg g <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup> ha <sup>-1</sup>
Acopio	1	12 bc	0.07 b	25.51 a
	2	15 c	0.07 b	25.44 a
	3	8 b	0.08 c	26.37 a
	4	7 b	0.07 b	26.49 a
Tecnosol	1	3 a	0.05 ab	41.75 c
	2	2 a	0.06 ab	37.91 bc
	3	2 a	0.06 ab	31.57 ab
	4	2 a	0.06 ab	31.44 ab

Tratamiento 1 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g de biochar + 15 g de sustrato arenoso de micorrizas); tratamiento 2 (*Guazuma ulmifolia* + 15 g de sustrato arenoso de micorrizas); tratamiento 3 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g biochar + 15 g sustrato arenoso micorrizas + 2 g de fertilizante químico-NPK); tratamiento 4 (*Guazuma ulmifolia*). Valores seguidos de la misma letra no presentan diferencias significativas según Duncan 0.05.

Treatment 1 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g of biochar + 15 g of sandy mycorrhizal substrate); treatment 2 (*Guazuma ulmifolia* + 15 g of sandy mycorrhizal substrate); treatment 3 (*Guazuma ulmifolia* + 25 g biochar + 15 g mycorrhizal sandy substrate + 2 g of chemical fertilizer-NPK); treatment 4 (*Guazuma ulmifolia*). Values followed by the same letter do not present significant differences according to Duncan 0.05.

foliar y de diámetro de 0.15 y 0.004 cm día<sup>-1</sup>, mientras que en los lotes 1, 3 y 8 la tasa de crecimiento foliar fue 0.11, 0.08 y 0.005 cm día<sup>-1</sup>, a su vez la tasa de crecimiento de los diámetros en estos fue menor a 0.003 cm día<sup>-1</sup>.

**Caracterización del suelo Tecnosol en lotes.** De acuerdo al Cuadro 4, el suelo Tecnosol presentó pH moderadamente ácido, no se encontró incremento significativo de pH en los lotes; por lo contrario, en el lote 5 el pH disminuyó a fuertemente ácido (4.69).



**Figura 6. Seguimiento a la plántula *Guazuma ulmifolia* en campo.** L1= lote 1 (suelo); L3 = lote 3(4.3 Mg ha<sup>-1</sup> de biochar); L5 = lote 5(4.3 Mg ha<sup>-1</sup> de biochar + 5.5 Mg ha<sup>-1</sup> de sustrato arenoso de micorrizas); L8 = lote 8(5.5 Mg ha<sup>-1</sup> sustrato arenoso de micorrizas). Lf = longitud foliar; D = diámetro.

**Figure 6. Follow-up to *Guazuma ulmifolia* seedling in field.** L1 = lot 1 (soil); L3 = lot 3 (4.3 Mg ha<sup>-1</sup> of biochar); L5 = lot 5 (4.3 Mg ha<sup>-1</sup> of biochar + 5.5 Mg ha<sup>-1</sup> of sandy mycorrhiza substrate); L8 = lot 8 (5.5 Mg ha<sup>-1</sup> sandy mycorrhiza substrate). Lf = leaf length and D = diameter.

**Cuadro 4. Características químicas del suelo Tecnosol en lotes.**  
**Table 4. Chemical characteristics of Tecnosol soil in batches.**

Propiedades	Antes de la intervención	Después de la intervención			
		Lote 1	Lote 3	Lote 5	Lote 8
pH (H <sup>+</sup> )	5.44 a	5.32 a	5.56 b	4.69 a	5.51 b
Conductividad eléctrica (dS m <sup>-1</sup> )	2.47	0.03	0.01	0.22	0.04
Fósforo (mg kg <sup>-1</sup> )	0.81	1.08	1.14	0.84	0.24

Por otro lado, se encontró diferencia significativa en la conductividad eléctrica por cada tratamiento aplicado, destacando el lote 3 que varió desde 2.47 a 0.01 dS m<sup>-1</sup> lo equivalente a una reducción del 99.39% con respecto al valor inicial. La concentración de fósforo se incrementó significativamente en los lotes 1 y 3 variando desde 0.81 mg kg<sup>-1</sup> a 1.08 y 1.14 mg kg<sup>-1</sup> lo equivalente a un 33.3 y 40.7%.

## CONCLUSIONES

La presencia del biochar en los procesos de germinación y crecimiento de las semillas de *Guazuma ulmifolia* incrementó el porcentaje de germinación, la longitud foliar y la biomasa de las plántulas. De acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio, el biochar en una dosis del 1% se considera la concentración adecuada para obtener la mayor germinación de semillas, a una dosis del 5% promueve de manera más efectiva el crecimiento foliar, radicular y el contenido de biomasa de la planta, pero con una concentración del 10% inhibió en cierto grado la germinación de la plántula.

La micorrización de *Guazuma ulmifolia* es un factor clave en la rehabilitación de suelos ya que por medio de éste, el árbol podrá soportar las condiciones adversas que otras especies no han podido hasta el momento. El biochar resulta de gran interés en este proceso, de acuerdo con los resultados la enmienda favoreció la infección en la raíz de la planta, así mismo las micorrizas y el biochar potencializaron el crecimiento foliar y del diámetro, y la biomasa.

El uso del biochar y los hongos formadores de micorrizas mostró un potencial significativo en el proceso de rehabilitación de suelos mineros, se evidenció una mejora en las propiedades fisicoquímicas del suelo, al mismo tiempo promovió

la actividad enzimática, micorrización y producción de la glomalina, mejorando así las condiciones edáficas. Los tratamientos 1 (planta+25 g de biochar + 15 g de sustrato arenoso de HMA) y 3 (planta + 25 g biochar + 15 de sustrato arenoso de HMA + 2 g de NPK) mostraron mejor respuesta en el mejoramiento de las características fisicoquímicas y microbiológicas de los suelos, con el tratamiento 1 se obtuvo una disminución de la densidad aparente, el incremento de fósforo, carbono orgánico y actividad enzimática, mientras que con el tratamiento 3 hubo mayor aumento de pH y glomalina, al mismo tiempo se encontró una disminución importante de la concentración de sales en los suelos. Con la plantación *in situ* en el suelo Tecnosol se demostró que los efectos del biochar y las micorrizas favorecen la disponibilidad de fósforo y carbono orgánico, aunque la variación de pH no fue significativa.

Dentro de las recomendaciones sugeridas por este estudio, se insita a evaluar con más exactitud el efecto del biochar y las micorrizas en el crecimiento radicular de la plántula *Guazuma ulmifolia*, ya que, por el alto contenido de arcilla en los suelos, el material se compactó en los rizotrones destruyéndose gran parte de las raíces al momento de extraerlas. Si se quiere establecer la plantación en campo, para garantizar un mayor éxito en el proceso de rehabilitación, se recomienda realizar la inoculación con los hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) en presencia de biochar cuando la planta esté en la etapa de producción. Teniendo en cuenta las reducciones significativas de la conductividad eléctrica en los suelos, resulta de gran interés evaluar los efectos del biochar, las micorrizas y la plántula en suelos con altas concentraciones de sales, también se propone estudiar la influencia de la planta en la variación de pH en los suelos.

Los resultados obtenidos en la presente investigación son un gran avance para la rehabilitación de suelos mineros, quienes por lo general presentan escasas de nutrientes y condiciones fisicoquímicas desfavorables, sabiendo que el uso de productos biotecnológicos como lo son el biochar, micorrizas arbusculares y plantas nativas en nuestro caso *Guazuma ulmifolia*, potencializan dicho proceso con la mejora de las propiedades de los suelos y los efectos positivos que causan en el crecimiento y supervivencia de la planta.

### DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

### CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

### DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles con los autores principales del trabajo (Laura Janeth Quiroz Mojica y María Margarita Daza Mendoza), ante solicitudes razonables.

### CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

### FONDOS

El estudio fue apoyado económicamente por la red de investigación RPBSD (red de Aprovechamiento de recursos naturales y obtención de productos biotecnológicos para suelos disturbados por actividad antrópica), aprobada y apoyada por Colciencias 2013-2018.

### CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

El desarrollo general de la investigación fue realizado por L.J.Q.M y M.M.D.M, quienes fueron las encargadas de elaborar y ejecutar el estudio, además, de escribir y editar el artículo, todo esto apoyado metodológica e investigativamente por L.C.D.M, quien fue la persona encargada de dirigir el estudio y revisar

el artículo. Así mismo, G.A.P.M contribuyó con la revisión del artículo, además en conjunto con L.C.D.M colaboró con la gestión de los recursos. A.E.M.R ayudó con el análisis estadístico de los datos y la revisión general del artículo.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del programa 1115-576-35893 de COLCIENCIAS (Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación), al Grupo de Investigación GEAB y a la red de investigación RPBSD.

### LITERATURA CITADA

- Aggangan, N. S., A. D. Cortes, and C. Reaño. 2019. Growth response of cacao (*Theobroma cacao* L.) plant as affected by bamboo biochar and arbuscular mycorrhizal fungi in sterilized and unsterilized soil. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 22: 101347. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101347>.
- Ahirwal, J. and S. K. Maiti. 2016. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India. *Catena* 140: 155-163. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.028>.
- Amoah, C., J. Kwiatkowska-Malina, S. F. Thornton, O. Fenton, G. Malina, and E. Szara. 2020. Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: A review. *Sci. Total Environ.* 722: 137852. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137852>.
- ANM (Agencia Nacional de Minería). 2013. Carbón. Bogota, Colombia. <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/carbon.pdf>. Consultado el 15/09/2019.
- Arranz, J. C. 2011. Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto en España: una revisión. *Bol. Geol. Minero* 122: 171-186.
- Arranz, J. C. 2015. Rehabilitación o remediación de espacios degradados por minería a cielo abierto: investigación, crecimiento e innovación en España. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España.
- Asensio, V., F. A. Vega, M. L. Andrades, and E. F. Covelo. 2013. Technosols made of wastes to improve physico-chemical characteristics of a copper mine soil. *Pedosphere* 23: 1-9. doi: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(12\)60074-5](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(12)60074-5).
- Barahona, E. and A. Iriarte. 2001. An overview of the present state of standardization of soil sampling in Spain. *Sci. Total Environ.* 264: 169-174. doi: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00620-3](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00620-3).
- Blanco C., H. 2017. Biochar and soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 84: 687-711. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>.
- Bouyoucos, G. J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils. *Agron. J.* 54: 464-465. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>.

- Brundrett, M. C. 2009. Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. *Plants Soil* 320: 37-77. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9877-9>.
- Bruneel, O., N. Mghazli, L. Sbabou, M. Héry, C. Casiot, and A. Filali-Maltouf. 2019. Role of microorganisms in rehabilitation of mining sites, focus on Sub Saharan African countries. *J. Geochem. Explorat.* 205: 106327. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.06.009>.
- Carbone-Carneiro, M. A., D. Alves-Ferreira, E. Damacena de Souza, H. Balbosa-Paulino, O. J. Saggin-Junior, and J. O. Siqueira. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi in soil aggregates from fields of "murundus" converted to agriculture. *Pesq. Agropec. Bras.* 50: 313-21. doi: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000400007>.
- Díaz-Muegue, L. C., J. C. Arranz- González, and G. Peñuela-Mesa. 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de suelos en zona carbonífera del Cesar, Colombia. *Interciencia* 38: 42-47.
- Díaz-Muegue, L. C., J. C. Arranz-González, and G. Peñuela-Mesa. 2017. Characterization and potential use of biochar for the remediation of coal mine waste containing efflorescent salts. *Sustainability* 9: 1-11.
- Domínguez-Haydara, Y., C. Castañeda, R. Rodríguez-Ochoa, and J. Jiménez. 2018. Assessment of soil fauna footprints at a rehabilitated coal mine using micromorphology and near infrared spectroscopy (NIRS). *Geoderma* 313: 135-145. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.032>.
- Dorr, P., K. Zhalnina, A. Davis-Richardson, J. C. Drew, F. B. Menezes, F. Camargo, and E. Triplett. 2016. Coal mining practices reduce the microbial biomass, richness and diversity of soil. *Appl. Soil Ecol.* 98:195-203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.016>.
- Escalante-Rebolledo, A., G. Perez-Lopez, C. Higaldo-Moreno, J. Lopez-Collado, J. Campo-Alves, E. Valtierra-Pacheco y J. Etchevers-Barra. 2016. Biocarbón (Biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana* 34: 367-382.
- Feng, Y., J. Wang, Z. Bai, and L. Reading. 2019. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review. *Earth Sci. Rev.* 191: 12-25. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.015>.
- Gerdemann, J. W. and T. H. Nicolson. 1963. Spores of mycorrhizal Endogone species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 46: 235-244. doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0).
- Hashem, A., A. Kumar, A. M. Al-Dbass, A. A. Alqarawi, A-B. Fahad Al-Arjani, G. Singh, M. Farooq, and E. F. Abd Allah. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. *Saudi J. Biol. Sci.* 26: 614-624. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2018.11.005>.
- Hernández Chaustre, M. 2003. Geología de la plancha 48 de la Jagua de Ibirico. Escala 1:100.00. Memoria explicativa. INGEOMINAS. Bogotá, D.C., Colombia.
- Hernández Vargas, G., L. Sánchez y F. Aragón. 2001. Tratamientos pregerminativos en cuatro especies arbóreas de uso forrajero de la selva baja caducifolia de la sierra de Manantlán. *For. Veracruzana* 3: 9-15.
- HUMBOLDT (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt). 2014. El bosque seco tropical en Colombia. Bogotá, D.C. ISBN: 978-958-8889-01-6.
- ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación). 2004. Norma Técnica Colombiana NTC 5167 norma de productos para la industria agrícola, productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas de suelo. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá, Colombia.
- ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación). 2014. Norma Técnica Colombiana NTC 5268 para la calidad de suelo - determinación de capacidad de intercambio. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. Bogotá, Colombia.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 1997. Estudio general de suelos del Departamento del César. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.
- IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2008. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá, Colombia.
- IGAC-CORPOCESAR (Instituto Geográfico Agustín Codazzi-Corporación Autónoma Regional Del Cesar). 2018. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento del Cesar. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. ISBN: 978-958-8323-90-9.
- Jung, S., Y. K. Park, and E. E. Kwon. 2019. Strategic use of biochar for CO<sub>2</sub> capture and sequestration. *J. CO<sub>2</sub> Util.* 32: 128-139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.04.012>.
- Laird, D. A., P. Fleming, D. D. Davis, R. Horton, B. Wang, and D. L. Karlen. 2010. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158: 443-449. doi: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013>.
- Lamarck, J. B. 1789. *Guazuma ulmifolia* Lam. *Encyclopedie Methodique, Botanique* 3: 52-53. doi: <https://doi.org/10.5962/bhl.title.824>.
- Lozano Sánchez, J. D., I. Armbrrecht y J. Montoya Lerma. 2015. Hongos formadores de micorrizas arbusculares y su efecto sobre la estructura de los suelos en fincas con manejos agroecológicos e intensivos. *Acta Agron.* 64: 289-29. doi: <https://doi.org/10.15446/acag.v64n4.46045>.
- Maiti, S. K. 2013. Minesoil properties affecting plant establishment and growth. pp. 61-81. *In*: S. Kumar Maiti (ed.). *Ecorestoration of the coalmine degraded lands*. Springer. India. eBook ISBN: 978-81-322-0851-8.
- Malik, Z., Z. Yutong, L. ShengGao, G. H. Abassi, S. Ali, M. I. Khan, M. Kamran, M. Jamil, M. I. Al-Wabel, and M. Rizwan. 2018. Effect of biochar and quicklime on growth of wheat and physicochemical properties of Ultisols. *Arab. J. Geosci.* 11: 496. doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3863-1>.
- Marrugo-Negrete, J., S. Marrugo-Madrid, J. Pinedo-Hernández, J. Durango-Hernández, and S. Díez. 2016. Screening of native plant species for phytoremediation potential at a Hg-contaminated mining site. *Sci. Total Environ.* 542: 809-816. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.117>.
- Massaccesi, L., G. M. N. Benucci, G. Gigliotti, S. Cocco, G. Corti, and A. Agnelli. 2015. Rhizosphere effect of three plant species of environment under periglacial conditions (Majella Massif, central Italy). *Soil Biol. Biochem.* 89: 184-195. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.07.010>.

- Meng, J., M. Tao, L. Wang, X. Liu, and J. Xu. 2018. Changes in heavy metal bioavailability and speciation from a Pb- Zn mining soil amended with biochars from co-pyrolysis of rice straw and mine manure. *Sci. Total Environ.* 663: 300-307. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.199>.
- Minambiente (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial). 2005. Plan de acción nacional lucha contra la desertificación y sequía en Colombia. Bogotá, Colombia. ISBN: 958-97679-2-3.
- Mingorance, M., E. Barahona, and J. Fernández-Gálvez. 2007. Guidelines for improving organic carbon recovery by the wet oxidation method. *Chemosphere* 68: 409-413. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.01.021>.
- Nautiyal, P., R. Rajput, D. Pandey, K. Arunachalam, and A. Arunachalam. 2019. Role of glomalin in soil carbon storage and its variation across land uses in temperate Himalayan regime. *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 21: 101311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101311>.
- Nirola, R., M. Megharaj, R. Aryal, P. Thavamani, K. Ramdass, B. Sarkar, and C. Saint. 2016. Stress responses and specific metal exclusion on mine soils based on germination and growth studies by Australian golden wattle. *Ecol. Indic.* 71: 113-122. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.062>.
- Olsen, S.E. and L.E. Sommers. 1982. Phosphorus. In: Page, ed. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Agronomy Monograph (9):* 403-427. American Society of Agronomy, Madison.
- Pavithra, D. and N. Yapa. 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi inoculation enhances drought stress tolerance of plants. *Groundwater Sust. Develop.* 7: 490-494. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.03.005>.
- Pizano, C. y H. García. 2014. El bosque seco tropical en Colombia. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). Bogotá, D.C., Colombia.
- Plaza, C., D. Courtier-Murias, J. Fernández, A. Polo, and A. J. Simpson. 2013. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. *Soil Biol. Biochem.* 57: 124-134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.07.026>.
- Puga, A. P., L. C. A. Melo, C. A. Abreu, A. R. Cosione, and J. Paz-Ferreiro. 2016. Leaching and fractionation of heavy metals in mining soils amended with biochar. *Soil Tillage Res.* 164: 25-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.01.008>.
- Quintão Scalon, S. P., R. Mara Mussury, V. L. de Mello Euzébio, F. Mitsuko Kodama, and C. Kissmann. 2011. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). *Ci. Fl.* 21: 655-662. doi: <https://doi.org/10.5902/198050984510>.
- Schnürer, J. and T. Rosswall. 1982. Fluorescein diacetate hydrolysis as a measure of total microbial activity in soil and litter. *Appl. Environ. Microbiol.* 43: 1256-1261. doi: <https://doi.org/10.1128/AEM.43.6.1256-1261.1982>.
- Seguel, A., R. Rubio, R. Carrillo, A. Espinosa, and F. Borie. 2008. Niveles de glomalina y su relación con características químicas y biológicas del suelo (andisol) en un relicto de bosque nativo del sur de Chile. *Bosque* 29: 11-22. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002008000100002>.
- Shamim, M., N. Saha, and F. Bintay. 2018. Effect of biochar on seed germination, early growth of *Oryza sativa* L. and soil nutrients. *Trop. Plant Res.* 5: 336-342. doi: <https://doi.org/10.22271/tpr.2018.v5.i3.042>.
- Souza, R. G., D. K. A. Silva, J. R. G. Oliveira, B. T. Goto, F. S. B. Silva, E. V. S. B. Sampaio, and L. C. Maia. 2012. Use of mycorrhizal seedlings on recovery of mined dunes in northeastern Brazil. *Pedobiologia* 55: 303-309. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2012.06.002>.
- Taktek, S., M. St-Arnaud, Y. Piché, J. A. Fortin, and H. Antoun. 2017. Igneous phosphate rock solubilization by biofilm-forming mycorrhizobacteria and hyphobacteria associated with *Rhizoglossum irregulare* DAOM 197198. *Mycorrhiza* 27: 13-22. doi: <https://doi.org/10.1007/s00572-016-0726-z>.
- Taktek, S., M. Trépanier, P. M. Servin, M. St-Arnaud, Y. Piché, J. A. Fortin, and H. Antoun. 2015. Trapping of phosphate solubilizing bacteria on hyphae of the arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* DAOM 197198. *Soil Biol. Biochem* 90: 1-9.
- Trippe, K. M., S. M. Griffith, G. M. Banowetz, and G. W. Whitaker. 2015. Changes in soil chemistry following wood and grass biochar amendments to an acidic agricultural production soil. *Agron. J.* 107: 1440-1446. doi: <https://doi.org/10.2134/agronj14.0593>.
- Trupiano, D., C. Cocozza, S. Baronti, C. Amendola, F. P. Vaccari, G. Lustrato, S. Di Lonardo, F. Fantasma, R. Tognetti, and G. S. Scippa. 2017. The effects of biochar and its combination with compost on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth, soil properties, and soil microbial activity and abundance. *Int. J. Agron.* 2017: 1-12. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/3158207>.
- UPME- MinMinas (Unidad de Planeación Minero Energética- Ministerio de Minas y Energía). 2012. La cadena de carbón. Subdirección de Información Minero Energética. República de Colombia. ISBN: 978-958-8363-12-7.
- Vierheilig, H., P. Schweiger, and M. Brundrett. 2005. An overview of methods for the detection and observation of arbuscular mycorrhizal fungi in roots. *Physiol. Plant.* 125: 393-404. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00564.x>.
- Wang, F. Y. 2017. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: Mechanisms and applications. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 47: 1901-1957. doi: <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1400853>.
- Wright, S. and A. Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Sci.* 161: 575-586. doi: <https://doi.org/10.1097/00010694-199609000-00003>.
- Xiao, L., B. Yinli, S. Du, Y. Wang, and C. Guo. 2019. Effects of revegetation type and arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on soil enzyme activities and microbial biomass in coal mining subsidence areas of Northern China. *Catena* 117: 202-209. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.02.019>.
- Xiao, Q., L. Zhu, H. Zhang, X. Li, Y. Shen, and S. Li. 2016. Soil amendment with biochar increases maize yields in a semi-arid region by improving soil quality and root growth. *Crop Past. Sci.* 67: 495-507. doi: <https://doi.org/10.1071/CP15351>.

- 
- 
- Zhang, Q., Z. Du, Y. Lou, and X. He. 2015. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions. *Catena* 127: 26-31. doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.009>.
- Zhao, G., X. Mu, Z. Wen, F. Wang, and P. Gao. 2013. Soil erosion, conservation, and eco-environment changes in the loess plateau of china. *Land Degradat. Develop.* 24: 499-510. doi: <https://doi.org/10.1002/ldr.2246>.
- Zhao, R., W. Gou, N. Bi, J. Guo, L. Wang, J. Zhao, and J. Zhang. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress. *Appl. Soil Ecol.* 88: 41-49. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.11.016>.
- Zwetsloot, M. J., J. Lehmann, T. Bauerle, S. Vanek, R. Hestrin, and A. Nigussie. 2016. Phosphorus availability from bone char in a P-fixing soil influenced by root-mycorrhizae-biochar interactions. *Plant Soil* 408: 95-105. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-016-2905-2>.