

Evaluación del efecto de hongos micorrícicos arbusculares en la respuesta al estrés por sequía de plántulas de balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb.)

José Herney Hurtado Arce



Universidad del Pacífico
Programa de Agronomía
Buenaventura, Colombia
2025

**Evaluación del efecto de hongos micorrícicos
arbusculares en la respuesta al estrés por sequía de
plántulas de balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.)
Urb.)**

José Herney Hurtado Arce

Tesina presentada como requisito para optar al título de: Agrónomo

Director:
PhD. Nilsen Lasso

Línea de investigación o proyección social:
Conservación de Suelos

Universidad del Pacífico
Programa de Agronomía
Buenaventura, Colombia
2025

DEDICATORIA

A Dios mi señor y creador, por ser mi luz y guía en cada paso de este viaje. Su sabiduría y amor me han acompañado en los momentos de duda y en las victorias, recordándome que todo es posible a través de la fe.

A mi amada esposa Yoselin Sánchez Cabrera, cuya amorosa presencia y apoyo incondicional me han dado la fuerza para seguir adelante, por siempre creer en mí, incluso cuando yo mismo dudaba. Tu paciencia y ánimo han sido mi refugio que necesitaba en las noches largas de trabajo. Este logro es tanto tuyo como mío.

A mis padres José Herney Hurtado Hurtado y María Luisa Arce Valenzuela, por su amor y sacrificio. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo Su apoyo inquebrantable ha sido el cimiento de todo lo que he logrado.

Y a mi familia, por ser un pilar de apoyo y cariño. Cada uno de ustedes ha contribuido a mi crecimiento y felicidad, y valoro profundamente cada momento compartido.

A todos ustedes, con todo mi cariño y gratitud, dedico este trabajo. Sin su amor y apoyo, este sueño no habría sido posible.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que han sido clave en la realización de esta investigación

Primero, a mi tutor y amigo, Nilsen L. Lasso Rivas. Su orientación, esfuerzo y constantes ánimos han sido una luz en este camino. Gracias por creer en mí y por guiarme con tanta dedicación. Su apoyo ha hecho toda la diferencia.

A Hernán Palacios, por su apoyo espiritual y por estar siempre presente en los momentos de incertidumbre. Su aliento y fe han sido un pilar fundamental en mis procesos, recordándome la importancia de perseverar y mantener la esperanza.

A los profesores de la Universidad del Pacífico, gracias por compartir su conocimiento y por inspirarme a ser mejor cada día. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en mi vida, y valoro profundamente lo que he aprendido de cada uno.

A todos ustedes, gracias de corazón. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

RESUMEN

El balsa (*Ochroma pyramidale*) es una especie arbórea tropical de rápido crecimiento, apreciada por su madera y su uso en la restauración ecológica de suelos degradados. El objetivo principal de esta investigación fue determinar el impacto de la colonización micorrícica en el crecimiento y las características fisiológicas de las plantas bajo condiciones de sequía y evaluar cómo los niveles de estrés hídrico afectan la interacción entre los HMA y el balsa. El estudio se realizó en el campus de la Universidad del Pacífico, en Buenaventura, Colombia, bajo condiciones controladas. Se utilizó un diseño completamente al azar con un arreglo factorial con dos factores: presencia de HMA (con y sin inoculación) y cuatro niveles de humedad del suelo (100%, 50% y 20% de la capacidad de campo). Las plántulas de balsa se cultivaron en un sustrato esterilizado de arena y suelo, y las plantas inoculadas recibieron 19 gramos de un inóculo comercial de HMA. Las variables evaluadas incluyeron altura, número de hojas, masa seca total, área foliar, índice de verdor y porcentaje de colonización micorrícica. Los resultados mostraron que la inoculación con HMA no tuvo efectos significativos en el crecimiento debido a una baja colonización micorrícica. Sin embargo, el estrés por sequía afectó negativamente el desarrollo de las plantas, especialmente en condiciones de sequía severa (20% de capacidad de campo). Las plantas con menor humedad presentaron una menor área foliar y masa seca. Estos hallazgos subrayan la importancia de mejorar las condiciones de colonización de los HMA en futuras investigaciones y explorar estrategias complementarias para aumentar la resiliencia del balsa al estrés hídrico

Palabras clave: *Árbol pionero, Micorrizas, Estrés hídrico, Respuesta al estrés, Crecimiento vegetal.*

ABSTRACT

Balsa (*Ochroma pyramidale*) is a fast-growing tropical tree species, valued for its wood and its use in the ecological restoration of degraded soils. The main objective of this research was to determine the impact of mycorrhizal colonization on plant growth and physiological characteristics under drought conditions and to evaluate how water stress levels affect the interaction between AMF and balsa. The study was conducted at the Universidad del Pacífico campus in Buenaventura, Colombia, under controlled conditions. A completely randomized design with a factorial arrangement with two factors was used: presence of AMF (with and without inoculation) and soil moisture levels (100%, 50%, and 20% of field capacity). Balsa seedlings were grown in a sterilized substrate of sand and soil, and inoculated plants received 19 grams of a commercial AMF inoculum. The variables evaluated included height, number of leaves, total dry mass, leaf area, greenness index, and percentage of mycorrhizal colonization. The results showed that inoculation with AMF had no significant effects on growth due to low mycorrhizal colonization. However, drought stress negatively affected plant development, especially under severe drought conditions (20% of field capacity). Plants with lower humidity had lower leaf area and dry mass. These findings underline the importance of improving AMF colonization conditions in future research and exploring complementary strategies to increase the resilience of the raft to water stress.

Keywords: *Pioneer tree, Mycorrhizae, Water stress, Stress response, Plant growth.*

CONTENDO

INTRODUCCIÓN	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2. JUSTIFICACIÓN	4
3. OBJETIVOS	5
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
4. MARCO TEÓRICO	6
4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE.....	6
4.2 MICROORGANISMOS DEL SUELO.....	7
4.3 LAS MICORRIZAS	7
4.3.1 Tipos de micorriza.....	7
4.4 ESTRÉS POR SEQUÍA Y MICORRIZACIÓN.....	8
5. DISEÑO METODOLÓGICO	9
5.1 LOCALIZACIÓN.....	9
5.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	10
5.2.1 Material vegetal.....	10
5.2.2 Diseño experimental.....	11
5.2.3 Condiciones de crecimiento.	11
5.2.4 Variables morfo fisiológicas evaluadas.....	12
5.2.5 Índice de verdor.....	12
5.2.6 Determinación del porcentaje de colonización micorrícica.	13
5.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS	13
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	13
6.1 EVALUACION DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO	13

CONCLUSIONES	19
RECOMENDACIONES	20
BIBLIOGRAFÍA	21
ANEXOS	26

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Ubicación del campus universitario Universidad del Pacífico Buenaventura Valle.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2. Semillas de balsa empleadas en el experimento.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3. Estructura tipo invernadero y montaje del experimento.</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4. Porcentaje de colonización de hongos endófitos y micorrícicos.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5. Estructuras fúngicas encontradas en las raíces de las plántulas de balsa.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6. Efecto de la sequía en variables morfo fisiológicas de plantas de balsa.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7. Efecto de la sequía en variables morfo fisiológicas de plantas de balsa.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8. Efecto de la sequía en AFE de plantas de balsa.</i>	<i>18</i>

INTRODUCCIÓN

El balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb.) es una especie arbórea que pertenece a la familia Malvácea, la cual se utiliza tanto para el aprovechamiento de su madera, como para la restauración de sitios alterados como lo señala (Yanes et al., 2001). En el mercado colombiano, la madera de balsa es utilizada en el campo del aeromodelismo, en la elaboración de maquetas, tableros y especialmente en proyectos de índole académico (Fuentes & Arango, 2005).

El balsa requiere de un clima cálido y húmedo, con cantidades mínimas de precipitación tolerables de 1500 mm anuales, excepto a lo largo de corrientes de agua, en donde el nivel del agua subterránea se encuentra cerca de la superficie y puede ser absorbida por las raíces (Francis 2000). En las últimas décadas ha crecido el interés de la comunidad científica por el estudio de los posibles efectos del cambio climático en la fisiología de especies vegetales de interés económico, es así como en diferentes regiones del trópico se han desarrollado investigaciones con la finalidad de determinar la respuesta fisiológica de las especies arbóreas al estrés por sequía y anegamiento (Gorai et al., 2010). El proceso más relevante para la adaptación y supervivencia de la planta tiene lugar en la rizosfera, que es la zona del suelo ocupada por las raíces de las plantas. Aquí se microbiológica variada y activa, cuya actividad está relacionada con diversos procesos vinculados al agua, nutrición mineral, intercambio de cationes y generación de exudados (Gorai et al., 2010).

Los resultados de diversas investigaciones apuntan a que los microorganismos de la rizosfera pueden inducir un aumento en la capacidad de respuesta de las especies forestales a los efectos del estrés abiótico (Tawaraya & Turjaman., 2014). Basado en los datos revelados con antelación se entiende que diversos microorganismos de la rizosfera tienen un efecto benéfico en el crecimiento de los árboles y entre estos están los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) los cuales son parte integral del sistema suelo, y diversos autores apoyan la importancia de la interacción con estos HMA. Un ejemplo es el de (Roveda et al., 2007), el cual en su publicación ha demostrado que la inoculación con micorrizas en plántulas propagadas axénicamente reduce el choque del trasplante y aumenta así la supervivencia porque estabiliza la planta; adicionalmente a esto, resultados con ensayos como los de (Carrillo et al., 2022), elaborados en viveros, con especies forestales, muestran que, los (HMA) permiten incrementar la supervivencia de las plantas de las especies forestales usadas para la rehabilitación y conservación de suelos.

Numerosos estudios resaltan el papel esencial de las interacciones simbióticas en la agricultura, especialmente en suelos que han sufrido degradación y presentan una baja capacidad para retener humedad. En este contexto, Gómez et al. (2015) explican que estos suelos suelen generar condiciones de sequía que limitan significativamente el crecimiento de las plantas. En tales circunstancias, las asociaciones simbióticas, como las micorrizas, desempeñan un rol clave al mejorar la absorción de nutrientes por parte de las plantas y, potencialmente, al aumentar su resistencia frente a la sequía.

Asimismo, Pérez et al. (2011) han demostrado que la colaboración entre plantas y microorganismos del suelo refuerza la capacidad de las plantas para tolerar situaciones de estrés hídrico, salinidad y los desafíos asociados al trasplante. Este efecto positivo se relaciona principalmente con el incremento en la captación de nutrientes y con la producción de compuestos que promueven el crecimiento de las plantas. Además, Fonnegra (2020) subraya que estas interacciones simbióticas favorecen una mayor producción de hormonas y un aumento en los niveles de clorofila, contribuyendo así al desarrollo saludable y vigoroso de las plantas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El balsa es una especie pionera de rápido crecimiento que no solo es aprovechada por las características de su madera, sino que también es utilizada en algunas partes del mundo en procesos de restauración ecológica y recuperación de suelos. En la actualidad el cambio climático es uno de los problemas ambientales más importantes que afrontan los ecosistemas, esto debido a que uno de sus mayores efectos es el incrementar la frecuencia de eventos de estrés abiótico (IDEAM y MADS., 2017). En ese sentido, el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en su Tercera comunicación nacional de cambio climático bajo el escenario 2011-2100 pronostica para Colombia aumentos en la temperatura hasta de 2,5 °C, así como aumento en la ocurrencia de eventos extremos de sequía. Las plantaciones de árboles de balsa se podrían ver afectadas de manera considerable por dichos eventos, pues ésta especie requiere de un régimen de precipitación no menor a 1500 mm anuales. Bajo este escenario se hace necesario identificar estrategias que permitan minimizar los efectos negativos que este tipo de estrés podría tener en el desarrollo del balsa. Múltiples investigaciones indican que los microorganismos de la rizosfera, como los hongos micorrícicos arbusculares podrían atenuar las alteraciones provocadas por la falta de agua y mejorar la capacidad de resistencia al estrés por sequía. Es necesario determinar el efecto de los microorganismos de la rizosfera en la sequía en el crecimiento del balsa con el fin de establecer si estos ayudan a mejorar el desempeño de las plantas sometidas a este tipo de estrés.

2. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta la actual necesidad de implementar programas de reforestación y restauración ecológica con especies nativas, hay un futuro prometedor para la estandarización de prácticas donde estén incluidos los HMA. En otras palabras, es necesario evaluar posibles métodos que permitan aumentar el porcentaje de supervivencia de las plántulas bajo condiciones futuras de alta frecuencia de eventos de estrés abiótico como la sequía, en ese sentido las micorrizas pueden convertirse en una herramienta importante que permita mejorar la recuperación de suelos degradados.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) en el crecimiento de plántulas de *O. pyramidale* sometidas a estrés por sequía.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar el efecto de la colonización micorrícica en el crecimiento de las plantas de *O. pyramidale*.

Determinar el efecto de la aplicación de inóculo micorrícico en variables fisiológicas y biométricas de plántulas de *O. pyramidale* bajo condiciones normales y de estrés por sequía.

Determinar el efecto del estrés por sequía en la colonización micorrícica de las plantas de *O. pyramidale*.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

El balsa es una especie forestal y producción maderera que presenta una gran demanda en el mercado internacional (Osorio et al., 2010). Esta especie se cultiva de manera natural y para reforestación, especialmente en la selva subtropical de la zona Ecuatorial, donde es uno de los recursos forestales y maderables de mayor aprovechamiento. Se desarrolla en un rango que va desde casi el nivel del mar hasta una altitud de 1800 m en Colombia (Venegas, 1978).

El balsa presenta muchos usos, en principal su madera se usa para la creación de modelos, artesanías y juguetes. Como chapa de interiores en construcciones, en capas con material sintético, aluminio y madera, en donde se necesite fortaleza y propiedades aislantes. Se usa también como material aislante masivo y libre de fuerzas electrostáticas en barcos para transporte criogénico (Francis, 2000).

Las plantas de balsa requieren de un clima cálido y húmedo y la cantidad mínima de precipitación que tolera es de alrededor de 1500 mm anuales (Osorio et al., 2010), excepto a lo largo de corrientes de agua, en donde el nivel del agua subterránea se encuentra cerca de la superficie y puede ser absorbida por las raíces. El balsa coloniza suelos arcillosos, margosos y limosos, e incluso el relleno de construcción recientemente depositado, pero no tolera los suelos de alta salinidad (Whitmore & Wool-Khoon, 1983).

El sistema de propagación del balsa hasta el momento es solo por semilla sexual siendo el único método conocido para plantaciones de esta especie, crecen de manera extremadamente rápida. Las plántulas alcanzarán alturas de entre 1.8 y 4.5 m al final de la primera temporada de su ciclo vegetativo y 11 m al final de la segunda. El tamaño final podrá ser de entre 25 y 30 m o más, y un árbol vigoroso puede alcanzar un diámetro a la altura del pecho (d.a.p.) de 40 cm en un período de 5 a 6 años de manera ocasional y algunos árboles alcanzan un d.a.p. de 100cm a una edad más avanzada (Francis, 2000). Debido a su tasa decrecimiento inusualmente alta, la balsa tiene la capacidad de concentrar en el tallo la mayoría de la energía asignada a la producción de madera mediante la producción de pocas ramas y de hojas grandes y sencillas con pecíolos en forma de ramas (Givnish, 1987).

En Colombia, existe en bosques secundarios húmedos de baja altitud, cerca de arroyos y espacios abiertos formados dentro del bosque. En estas condiciones geográficas puede tener hasta 30 m de altura y 70 cm de diámetro. Esta especie juega un papel importante en el ecosistema, entre los que destacan la protección de los cursos de hídricos (río y arroyo), el control de la erosión y la protección del hábitat de animales y plantas silvestres. Por otro lado, La madera de *O. pyramidale* es de importancia económica y ambiental en las áreas en el municipio de Atrato y de Cértegui en Chocó donde es común en áreas degradadas por la minería. Sin embargo, aún se desconocen una serie de aspectos como su durabilidad y resistencia natural (Serna et al., 2020).

4.2 MICROORGANISMOS DEL SUELO

La estructura del suelo constituye un hábitat que permite el desarrollo de una gran diversidad de microorganismos, la mayor concentración de estos se encuentra en la zona cercana a las raíces en lo que se conoce como el nombre de rizosfera. Los microorganismos que se encuentran en ella, se relacionan con las plantas de diferentes formas: algunos de ellos de forma saprofítica cuando se alimentan de los residuos de las raíces, otros causan enfermedades a las plantas en lo que es una relación parasítica, finalmente pueden relacionarse de forma simbiótica en la cual los microorganismos proporcionan un beneficio a las plantas a cambio de alimento (Sana, 2014).

4.3 LAS MICORRIZAS

Las micorrizas son asociaciones entre la mayoría de las plantas existentes y los hongos benéficos, que incrementan el volumen de la raíz y, por tanto, permiten una mayor exploración de la rizosfera. Son considerados los componentes más activos de los órganos de absorción de los nutrientes de la planta, la que a su vez provee al hongo simbiote de nutrientes orgánicos y de un nicho protector (Corredor, 2008 citado por Noda, 2009). Existen alrededor de 5,000 especies de estos hongos, que se agrupan en tres grandes divisiones: Basidiomycota, Ascomycota y Glomeromycota (Ruiz et al., 2013).

4.3.1 Tipos de micorriza.

Dependiendo de su estructura, se clasifican en tres tipos principales: ectomicorrizas, ectendomicorrizas y endomicorrizas, que a su vez se subdividen en varias categorías. Los hongos micorrícicos arbusculares (HMA) son especialmente conocidos por sus beneficios para las plantas y, aunque son naturales del suelo, el ser humano ha aprendido a aislarlos y cultivarlos para diversos usos ecológicos y agrícolas (Ojeda et al., 2014).

4.3.1.1 Ectomicorrizas.

Las ectomicorrizas actúan en el exterior de las raíces desarrollan un manto que las envuelve y que crecen al interior de las células suelen ser bastante específicas lo que significa que una especie de hongo solo puede asociarse con un tipo de planta en concreto. Esto dificulta la expansión de este tipo de asociaciones, además son bastante más sensibles a agresiones externas que las endomicorrizas. En general sobreviven con dificultad si no están asociadas a una raíz viva y en estos casos su crecimiento es muy limitado si la micorriza no se asocia con una raíz viva en plazo de diez días no sobrevivirá (Ojeda et al., 2014).

4.3.1.2 Endomicorrizas.

Las endomicorrizas, particularmente las micorrizas arbusculares (MA), destacan por su papel crucial en la absorción de nutrientes, como el fósforo (P), en las plantas. Estas asociaciones

simbióticas se caracterizan por el desarrollo de estructuras que penetran el interior de las células corticales (arbusculos), estructuras especializadas donde ocurre la transferencia bidireccional de nutrientes, y vesículas, que funcionan como órganos de almacenamiento. Diversos estudios han demostrado que la aplicación de abonos verdes incrementa la longitud y actividad del micelio externo, favoreciendo una mayor colonización por arbusculos y mejorando la fertilidad del suelo (Vélez Zabala & Sánchez de Prager, 2014). Las micorrizas arbusculares representan el mayor grupo de micorrizas, ya que presentan poca especificidad por un simbiote. Los hongos que participan en esta asociación de micorrizas arbusculares pertenecen a la clase *Zygomycetes*. Las micorrizas arbusculares se consideran las de mayor importancia ecológica y se encuentran de manera natural en la mayoría de los cultivos (Perona & Vidal, 2007).

4.3.1.3 Ectendomicorrizas.

Son una forma intermedia de asociación micorrícica que combina características de las ectomicorrizas y las endomicorrizas, lo que las convierte en un recurso estratégico para las plantas bajo condiciones de estrés abiótico, como la sequía. Estas asociaciones micorrícicas forman estructuras tanto externas como internas en las raíces, permitiendo una mayor superficie de contacto entre la planta y el hongo. Esto mejora la absorción de agua y nutrientes, particularmente fósforo y nitrógeno, elementos esenciales para mantener la actividad metabólica durante periodos de déficit hídrico (Smith & Read, 2008). Además, las ectendomicorrizas modulan la producción de hormonas como las auxinas y los ácidos abscísicos, que regulan respuestas fisiológicas clave frente a la sequía, incluyendo el cierre estomático y el ajuste osmótico (van der Heijden et al., 2015).

4.4 ESTRÉS POR SEQUÍA Y MICORRIZACIÓN

El estrés por sequía es uno de los principales factores abióticos que limitan el crecimiento y la productividad de las plantas a nivel mundial, afectando procesos fisiológicos fundamentales como la fotosíntesis, la transpiración y el transporte de nutrientes. Durante la sequía, la disponibilidad limitada de agua en el suelo genera una reducción en el potencial hídrico de las plantas, lo que desencadena el cierre estomático para minimizar la pérdida de agua, pero también reduce la entrada de dióxido de carbono, impactando negativamente la tasa fotosintética (Flexas et al., 2014). Este estrés puede conducir a la acumulación de especies reactivas de oxígeno (ROS), provocando daño oxidativo en lípidos, proteínas y ácidos nucleicos, lo que afecta la integridad celular y el metabolismo (Chaves et al., 2009). Sin embargo, las plantas han desarrollado mecanismos de defensa frente a la sequía, como el ajuste osmótico, el aumento en la producción de antioxidantes y la asociación con microorganismos beneficiosos como hongos micorrícicos y bacterias promotoras del crecimiento vegetal, los cuales pueden mejorar la capacidad de las plantas para tolerar condiciones de estrés hídrico al promover la absorción de agua y nutrientes, y modular las respuestas fisiológicas y hormonales (Zhang et al., 2018).

Los HMA juegan un papel crucial en la respuesta de las plantas a la sequía al ayudar a las plantas a absorber más agua y nutrientes, lo que mejora su crecimiento y reproducción en condiciones

difíciles (Baum et al., 2015). Por ejemplo, los hongos *Glomus mosseae* y *Glomus intraradices*, en asociación con *Vigna radiata* L., mejoran la capacidad de las raíces para absorber agua y nutrientes, lo que resulta en un mejor rendimiento de las semillas (Habibzadeh et al., 2013). Además, al inocular plantas de *Cicer arietinum* L. con *Rhizophagus irregularis* y *Mesorhizobium mediterraneum*, se observa un aumento en el contenido de la biomasa de la planta, incluso bajo condiciones de estrés hídrico (Oliveira et al., 2017). El hongo *Glomus intraradices* también ha demostrado ser muy beneficioso para la palma datilera (*Phoenix dactylifera* L.), ayudando a las plantas a mantener su contenido de agua en las hojas, incluso cuando hay una cantidad limitada de agua disponible (Baslam et al., 2014). Esto respalda la idea de Muñoz (2018) de usar los HMA para mejorar la agricultura en regiones áridas y desérticas, sobre todo para cultivos como leguminosas y granos básicos, ya que estos hongos ayudan a reducir el consumo de agua, incluso en situaciones de sequía severa. Se ha demostrado que las micorrizas influyen positivamente en múltiples aspectos fisiológicos y bioquímicos de las plantas bajo condiciones de sequía. Por ejemplo, mejoran la regulación de acuaporinas, proteínas clave en el transporte de agua y solutos, lo que optimiza el flujo hídrico en la raíz y minimiza los efectos del déficit hídrico (Bárzana, 2014). Además, las HMA regulan mecanismos como la osmoregulación y el equilibrio hormonal, incluyendo la modulación del ácido abscísico, que es crucial en la respuesta al estrés hídrico (Ruiz-Lozano et al., 2012). Este efecto se traduce en una mejor conservación del contenido hídrico relativo en las hojas y una mayor eficiencia fotosintética, incluso en condiciones de alta demanda evaporativa (Bárzana et al., 2012). La acción de las micorrizas también se extiende a la mejora de las propiedades hidráulicas de las raíces, favoreciendo tanto el transporte de agua por la vía apoplástica como el simplasto, lo que asegura un suministro constante de agua a la parte aérea de la planta (Aroca et al., 2012). Esto permite a las plantas micorrizadas mantener su metabolismo activo y soportar mejor los periodos prolongados de sequía.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1 LOCALIZACIÓN

La investigación se llevó a cabo en el Campus de la Universidad del Pacífico, localizado en el Km 13 vía al Aeropuerto, Barrio Triunfo Distrito Especial de Buenaventura, Valle del Cauca geográficamente ubicada en una latitud de 3° 50` N y longitud de 76°59` O (figura 1). Las condiciones edafoclimáticas del área de estudio son: temperatura promedio anual 25,5 °C, precipitación 7.407,9 mm, humedad relativa 90%, brillo solar se registra 2-3 horas días luz (Torres., 2010).

Figura 1. Ubicación del campus universitario Universidad del Pacífico Buenaventura Valle.



Fuente: Google Maps.

5.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

5.2.1 Material vegetal.

Para la realización de este experimento se utilizó semilla sexual colectada de árboles de diversas localidades del Distrito Especial de Buenaventura (figura 2). Las semillas fueron sometidas a un tratamiento pre-germinativo que consistió en sumergirlas en agua hirviendo durante un minuto, después de esto se procedió a siembra directa en las macetas plásticas para su posterior seguimiento.

Figura 2. Semillas de balsa empleadas en el experimento.



Fuente: Propia.

5.2.2 Diseño experimental.

El experimento consistió en un diseño completamente al azar con un arreglo factorial con dos factores: HMA y humedad del suelo. El factor humedad del suelo contó con tres niveles correspondientes a: control (100% de la capacidad de campo (C.C) de la maceta), sequía media (equivalente al 50% de C.C.) y sequía severa (20% de C.C.); el factor HMA contó con dos niveles sin HMA y con HMA. Para un total de 6 tratamientos con 8 repeticiones cada uno, 48 de plantas en total.

5.2.3 Condiciones de crecimiento.

Las semillas fueron sembradas en germinadores de plástico durante 3 semanas, pasado este tiempo fueron trasplantadas a macetas de plástico de 4 Kg rellenas con una mezcla de arena y suelo de vega de río con una proporción 1:1 previamente tamizado y esterilizado. En el momento del trasplante las macetas fueron inoculadas, con 19 gramos del inóculo micorrízico comercial "Micorrizas SAFER®", para las plantas de control se usó el mismo inóculo, pero previamente esterilizado.

Las plantas se mantuvieron al interior de una estructura de tipo invernadero (figura 3). Para determinar el porcentaje de humedad en las macetas, se llenaron las macetas con suelo seco, se tomó la medida de peso con una balanza (p_1) y se saturó de agua para posteriormente dejar drenar los excesos por 24 horas y que este llegue al punto de capacidad de campo (CC) o (p_2). Para obtener el volumen de agua para los tratamientos de 50% y 20% de sequía se calcularon de la siguiente manera: $50\% \text{ CC} = (0.50 \times (p_2 - p_1))$, $20\% \text{ CC} = (0.20 \times (p_2 - p_1))$. Las plántulas fueron regadas 3 veces por semana durante todo el proceso.

Figura 3. Estructura tipo invernadero y montaje del experimento.



Fuente: Propia.

5.2.4 Variables morfo fisiológicas evaluadas.

Las plantas fueron mantenidas bajo riego normal por un periodo de dos meses, pasado este tiempo se inició con los tratamientos de sequía durante 30 días. Al finalizar este periodo las plantas fueron cosechadas. En el momento de la cosecha se determinó la altura y el número de hojas; las plantas se separaron en raíces, hojas y tallos y fueron colocadas en bolsas de papel y llevadas al horno a 70 °C durante 48 horas. Finalmente se determinó el peso seco de las muestras.

5.2.5 Índice de verdor.

El día previo a la cosecha de las plantas se determinó el índice de verdor de las hojas mediante un medidor de clorofila utilizando el medidor de clorofila TSY® en unidades SPAD (Figueredo y Fraija 2017), para esto se tomó el promedio de 5 lecturas obtenidas en diferentes partes en la parte media de la segunda hoja totalmente desarrollada.

5.2.6 Determinación del porcentaje de colonización micorrícica.

Después de realizados los procedimientos propuestos para la cosecha de las plantas se tomaron muestras de raíces de las plantas (0,5 g), luego se lavaron y se pusieron en tubos de ensayo para posteriormente adicionar KOH al 10% y llevar a baño María a 90 °C por 20 minutos. Posteriormente se realizó un secado y lavado con agua destilada, adicionando agua oxigenada más KOH al 10% por 2 min y HCl al 1%, por un minuto, para luego llevar a baño de María por 1 minuto, posteriormente se lavaron con agua destilada, y se adicionó azul de tripano al 0,1% y nuevamente se llevó a baño maría por 5 minutos, por último las raíces fueron colocadas en cajas Petri, cortadas en fragmentos de 1 cm aproximadamente y se extendieron en portaobjetos con su respectivo cubreobjetos; finalmente, se realizaron observaciones al microscopio a 10X para determinar la presencia de estructuras fúngicas (hifas, vesículas y esporas). Se determinó el porcentaje de micorrizas calculando la relación entre el número de campos con presencia de estructura HMA y el número total de campos observados multiplicado por 100.

5.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS

Para determinar la existencia de diferencias entre los tratamientos los datos fueron sometidos a un análisis de varianza, en los casos en que existieron diferencias significativas entre tratamientos se empleó la prueba de separación de medias de Tukey para determinar la naturaleza de dichas diferencias. Para la realización de los todos los análisis estadísticos se utilizó el programa estadístico R-4.1.1.

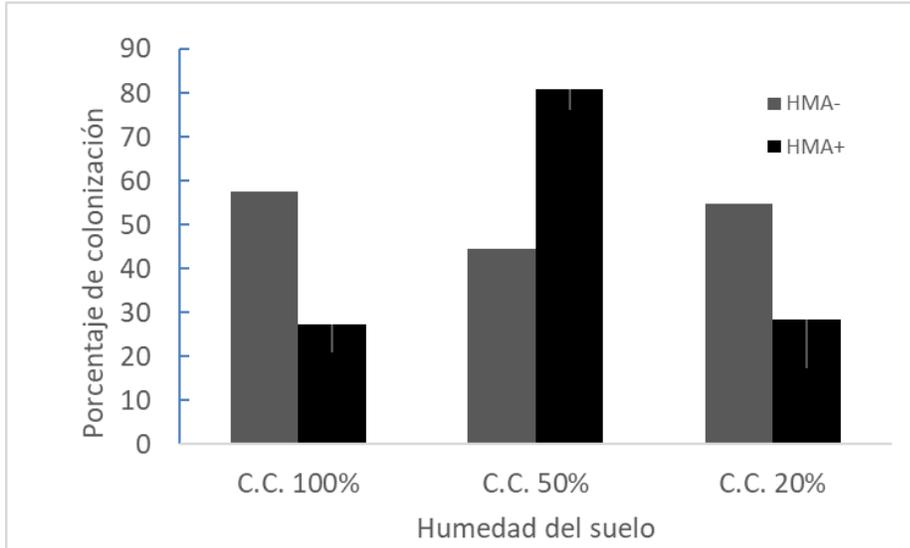
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 EVALUACION DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO

De acuerdo con el análisis de varianza, no se encontraron diferencias significativas para entre los tratamientos de micorriza para ninguna de las variables evaluadas (tabla 1). La falta de efectos significativos de los HMA en el crecimiento y la acumulación de biomasa en condiciones de sequía contrasta con los estudios que informan que los HMA a menudo mejoran la respuesta de las plantas a la sequía al mejorar la absorción de agua y nutrientes, en particular el fósforo (Smith et al., 2011; Ruiz-Lozano et al., 2016). El resultado inesperado se debió probablemente a que se presentó una colonización extremadamente baja de micorrizas, por el contrario, se encontró una colonización alta de hongos endófitos (figura 4 y 5). En este sentido, García et al. (2020) observaron una colonización limitada de HMA y efectos de crecimiento no significativos bajo una alta presencia de hongos endófitos en especies tropicales. Los endófitos pueden competir con HMA por sitios de colonización de raíces y recursos, especialmente en condiciones de estrés, lo que potencialmente limita los beneficios típicamente asociados con HMA (Rodríguez y Redman,

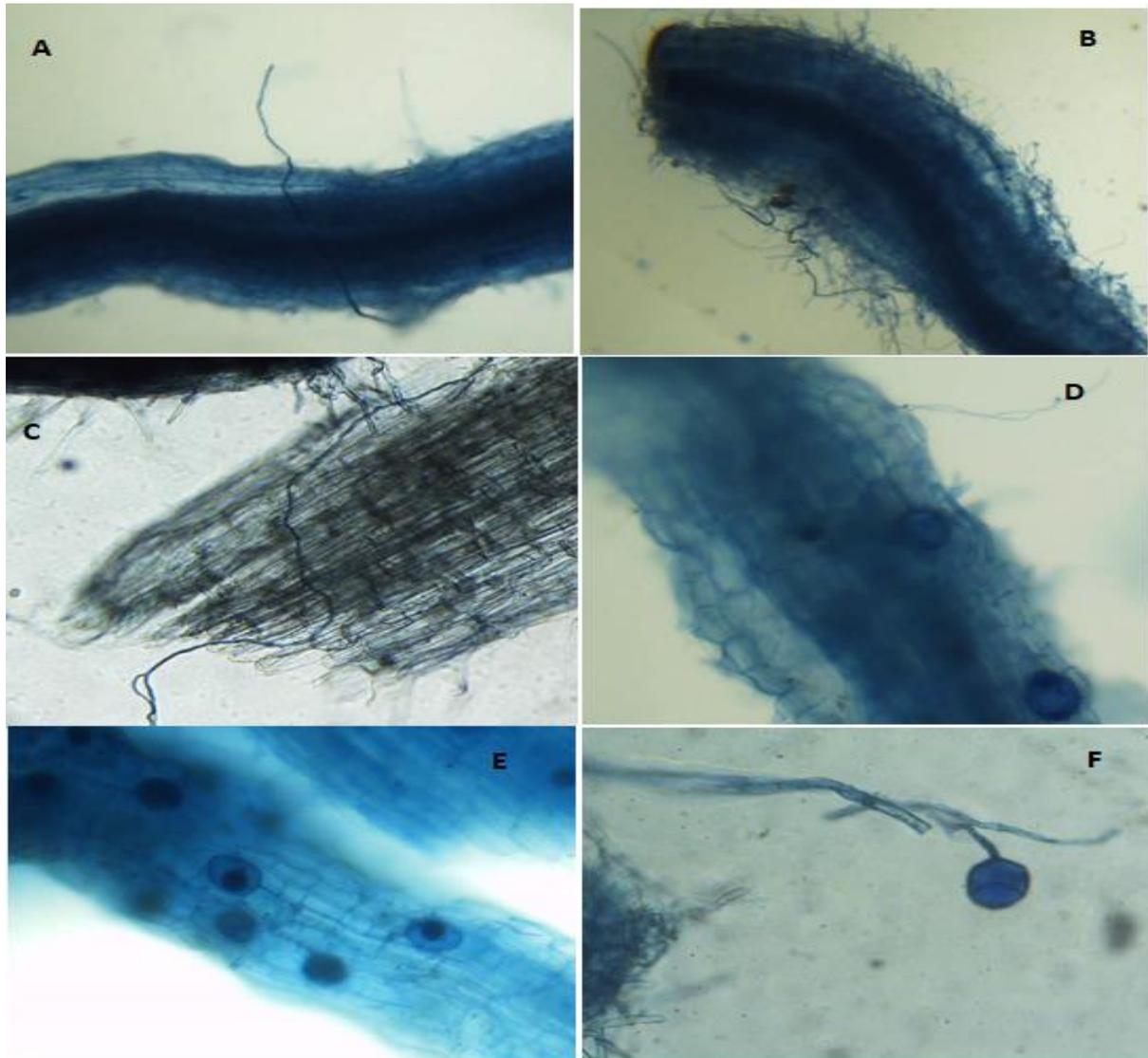
2008). Vale la pena mencionar que, si bien se hizo la esterilización del suelo, pasó un tiempo largo para el montaje del experimento, durante ese tiempo es posible que haya habido una contaminación del sustrato por las esporas de los endófitos dado que las condiciones de almacenamiento no fueron las más ideales.

Figura 4. Porcentaje de colonización de hongos endófitos y micorrícicos.



Fuente: Propia.

Figura 5. Estructuras fúngicas encontradas en las raíces de las plántulas de balso.



Fuente: Propia

Nota: Hifa de HMA (A); Hifa de hongo endófito (B, C); Vesículas de HMA (D); Espora de hongo endófito (E, F).

Por otra parte, el análisis de varianza indica diferencias significativas entre los tratamientos de humedad de suelo para todas las variables evaluadas exceptuando la variable altura (tabla 1).

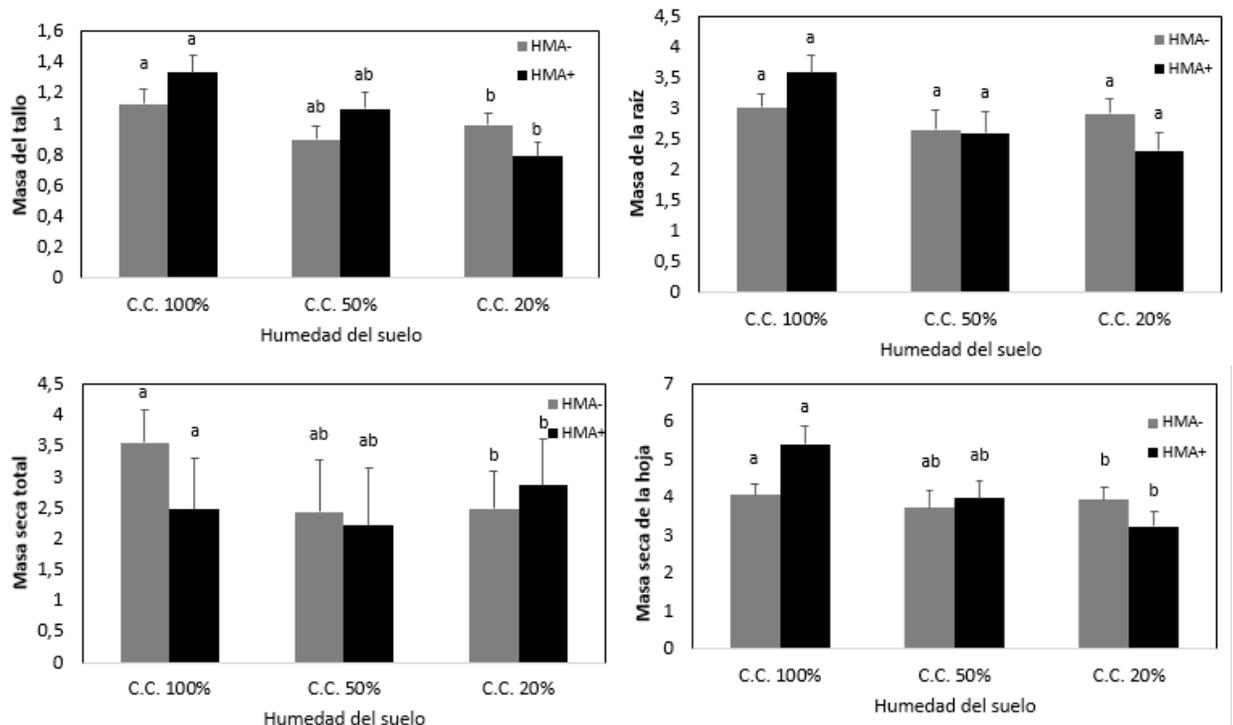
Tabla 1. Resultado del análisis de varianza para los parámetros de crecimiento de las plantas de balso.

Parámetro	Micorriza			Humedad			Micorriza : Humedad		
	GL	F	Pr(>F)	GL	F	Pr(>F)	GL	F	Pr(>F)
Numero de hojas	1	0.757	0.389	2	37.843	4,01e-10***	2	1.035	0.364
Altura	1	0.01	0.92	2	1.05	0.359	2	1.179	0.318
Masa seca	1	0.815	0.3718	2	4.451	0,0176*	2	3.125	0,0543.
Área foliar	1	0.035	0.853	2	16.801	4,36e-06***	2	1.842	1.071
Masa seca tallo	1	0.683	0.41328	2	6.48	0,00353**	2	2.917	0.06512
Masa seca raíz	1	0.012	0.9137	2	3.972	0,306*	2	2.101	0.135
Masa seca total	1	0.298	0.5879	2	4.708	0,0143*	2	2.816	0.0712
Área foliar específica	1	1.051	0.3112	2	3.481	0,0399*	2	1.534	0.2275
Índice de verdor	1	1.69	0.2	2	56.11	1.4e-12***	2	0.98	0.38

Fuente: Propia.

Los resultados de la prueba de separación mostraron que las plantas del control presentaban en promedio mayor número de hojas, masa seca total, masa seca de la hoja y masa seca de la raíz (figura 6).

Figura 6. Efecto de la sequía en variables morfo fisiológicas de plantas de balso.

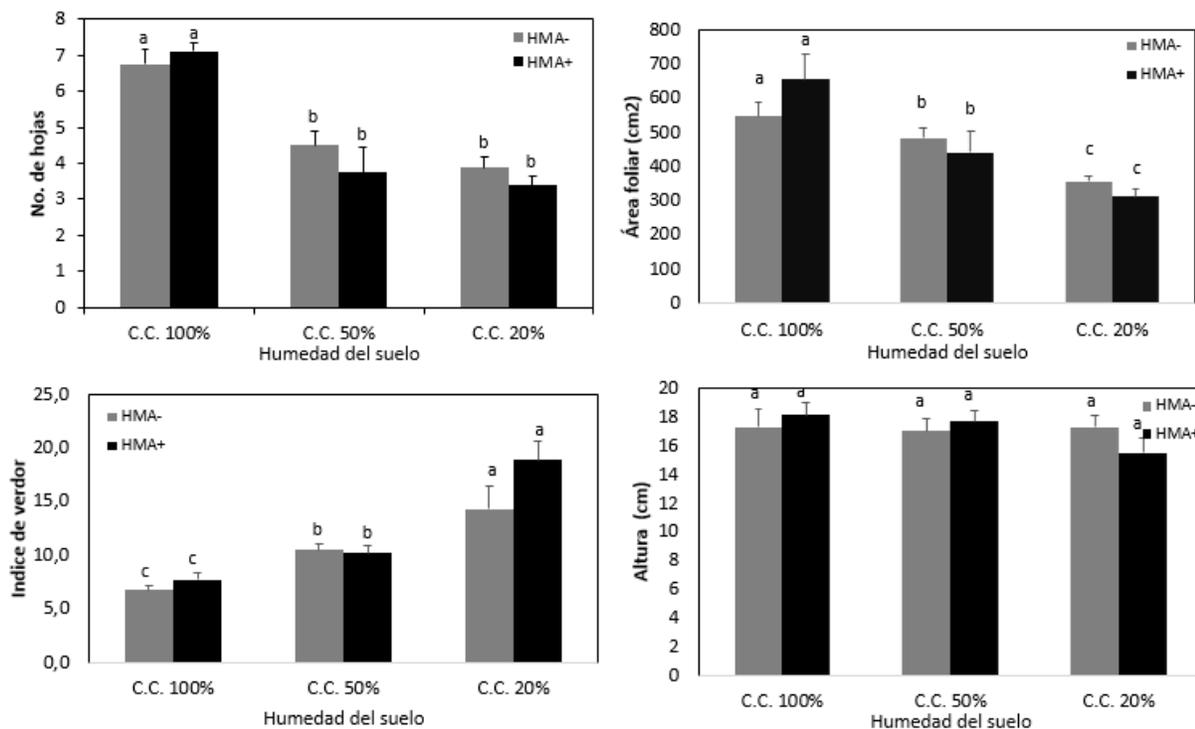


Fuente: Propia.

Nota: Barras con la misma letra no son significativamente diferentes $p < 0.05$.

La prueba Tukey arrojó que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de 50% y 20% CC, por lo tanto, las plantas sometidas a sequía crecieron menos que las plantas del control. Para la variable área foliar, las plantas del control presentaron los valores más altos seguidas por las plantas del 50% y finalmente las plantas 20% que presentaron los valores promedio más bajos (figura 7). Para la variable Área foliar específica (AFE), área foliar dividido peso seco de la hoja, no hubo diferencias entre el control y el tratamiento del 50% siendo las plantas 20% las que presentaron los valores más bajos (figura 8). Para la variable índice de verdor la separación de medias indica que las plantas del 20% presentaron valores más altos que las plantas del 50% y del control (Figura 7).

Figura 7. Efecto de la sequía en variables morfo fisiológicas de plantas de balsa.



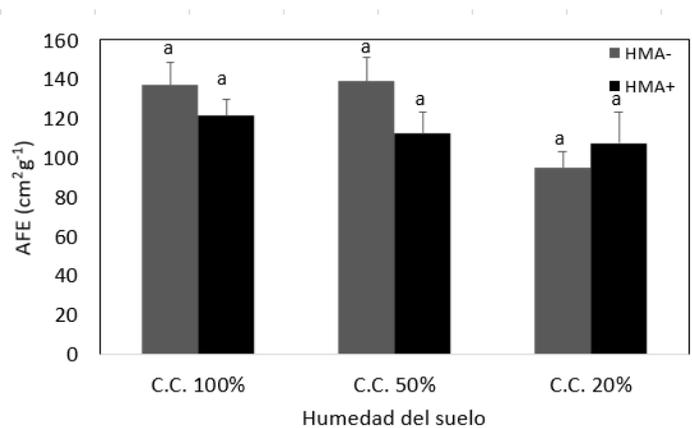
Fuente: Propia.

Nota: Barras con la misma letra no son significativamente diferentes $p < 0.05$.

Los resultados aquí presentados muestran que el estrés por sequía afectó de manera consistente la acumulación y morfología de biomasa de las plantas, lo que refleja las limitaciones de crecimiento impuestas por el déficit hídrico severo. Estos hallazgos coinciden con los estudios que indican que la escasez de agua limita la expansión de las raíces y la biomasa general debido a la reducción de la capacidad fotosintética y la adquisición de nutrientes en condiciones de escasez de agua (Chaves et al., 2009; Hoekstra et al., 2020). Las plantas bajo estrés por sequía generalmente asignan recursos al desarrollo de raíces a expensas de la biomasa aérea para mejorar la adquisición de agua (Taiz et al., 2018). Sin embargo, en este estudio, incluso la masa seca de la raíz fue notablemente menor en el tratamiento de sequía severa, lo que indica que O.

Pyramidale puede carecer de fuertes mecanismos de adaptación a la sequía que prioricen el crecimiento de las raíces bajo estrés severo. Los valores bajos AFE observados en el tratamiento de 20% de humedad indican respuestas adaptativas, ya que una AFE reducida a menudo se asocia con hojas más gruesas, lo que puede minimizar la pérdida de agua por unidad de área foliar en condiciones de sequía (Poorter et al., 2009). El grupo de control (100% de humedad del suelo) presentó consistentemente los valores más altos en cantidad de hojas, masa seca total y categorías específicas de biomasa, lo que subraya la importancia de la disponibilidad de agua para un crecimiento óptimo en *O. Pyramidale*.

Figura 8. Efecto de la sequía en AFE de plantas de balsa.



Fuente: Propia.

Nota: Barras con la misma letra no son significativamente diferentes $p < 0.05$.

El aumento en los valores del índice de verdor en plantas sometidas a sequía severa en comparación con aquellas sometidas a una sequía moderada o condiciones de buen riego resultó inesperado, y es que la literatura indica que una respuesta al déficit hídrico es la reducción en la concentración de clorofila. Sin embargo, algunos autores han encontrado que el contenido de agua en las hojas afecta las lecturas del medidor SPAD y en consecuencia modifica la relación entre el índice de verdor y el contenido de clorofila (Marenco et al., 2009; Martínez & Guiamet, 2004). Así, la disminución del contenido relativo de agua en la planta, puede resultar en un incremento en las lecturas de SPAD debido a una disminución en la transmitancia aparente de las hojas a 650 nm respecto a 940nm sin que esto implique un aumento real en la concentración de clorofila en las hojas (Martínez & Guiamet, 2004).

En general, el estudio demuestra que las plántulas de *O. Pyramidale* muestran respuestas morfológicas y fisiológicas significativas al estrés por sequía, caracterizadas por una asignación de biomasa alterada y una reducción del área de la hoja en condiciones de sequía severa.

CONCLUSIONES

El tratamiento con HMA no generó un efecto significativo en ninguna de las variables de crecimiento evaluadas en las plántulas de balsa probablemente debido a los bajos niveles de colonización y presencia de abundantes hongos endófitos. Lo anterior pudo ser causado por el mal almacenamiento del suelo esterilizado antes de siembra. Estos resultados resaltan la importancia de considerar las complejas interacciones microbianas dentro de la zona de la raíz, ya que el predominio de un grupo microbiano (por ejemplo, los endófitos) puede modular los beneficios potenciales de los HMA en condiciones de estrés.

La falta de un efecto positivo de los HMA bajo las condiciones de este estudio resalta la importancia de asegurar una colonización micorrícica adecuada para poder evaluar correctamente su impacto en las plantas. Factores como la compatibilidad entre la planta huésped y los hongos micorrícicos (en especial al usar cepas comerciales), así como las condiciones ambientales, pueden influir significativamente en la eficacia de la colonización y, por ende, en los beneficios potenciales de los HMA.

El estrés por sequía tuvo un efecto negativo en el crecimiento de las plantas, lo cual era esperado debido a la reducción en la disponibilidad de agua, un recurso crucial para el desarrollo vegetal. Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en el crecimiento de las plántulas entre los tratamientos de 50% y 20% de sequía. Esto sugiere que, aunque la sequía afectó negativamente el crecimiento, las plantas de balsa fueron igualmente afectadas por ambos niveles de estrés hídrico.

RECOMENDACIONES

Para futuros estudios, se recomienda optimizar las condiciones para la colonización micorrícica, mediante la inoculación con cepas de HMA aisladas de raíces de plantas de balsa silvestres. Además, sería beneficioso investigar el efecto de los HMA en combinación con microorganismos benéficos, como bacterias promotoras del crecimiento vegetal, para evaluar sinergias potenciales que puedan mejorar el crecimiento y la resiliencia de las plántulas de balsa.

No se recomienda el uso de medidores de índice de verdor SPAD para determinar la concentración de clorofila en experimentos que involucren déficit hídrico, en dichos casos se debe realizar una cuantificación directa.

BIBLIOGRAFÍA

- Aroca, R., Ruiz-Lozano, J. M., & Bárzana, G. (2012). Control estomático y contenido hídrico foliar en plantas micorrizadas bajo estrés hídrico. *Plant Molecular Biology*, 70, 565-579.
- Bárzana, G. (2014). Regulación por micorrizas arbusculares de la fisiología y las acuaporinas de maíz (*Zea mays* L.) en relación con la tolerancia de la planta hospedadora al déficit hídrico (Tesis doctoral). Universidad de Granada.
- Bárzana, G., Aroca, R., Paz, J. A., Chaumont, F., Martínez-Ballesta, M. C., Carvajal, M., & Ruiz-Lozano, J. M. (2012). Arbuscular mycorrhizal symbiosis increases relative apoplastic water flow in roots of the host plant under both well-watered and drought stress conditions. *Annals of Botany*, 109(5), 1009-1017.
- Baslam, M., Qaddoury, A., & Goicoechea, N. (2014). Role of native and exotic mycorrhizal symbiosis to develop morphological, physiological and biochemical responses coping with water drought of date palm, *Phoenix dactylifera*. *Trees*, 28, 161-172.
- Baum, C., El-Tohamy, W., & Gruda, N. (2015). Increasing the productivity and product quality of vegetable crops using arbuscular mycorrhizal fungi: a review. *Scientia horticulturae*, 187, 131-141.
- Carrillo-Saucedo, S. M., Puente-Rivera, J., Montes-Recinas, S., & Cruz-Ortega, R. (2022). Las micorrizas como una herramienta para la restauración ecológica. *Acta botánica mexicana*, (129).
- Chaves, M. M., Flexas, J., & Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 103(4), 551-560.
- Chaves, M. M., Maroco, J. P., & Pereira, J. S. (2009). Understanding plant responses to drought—from genes to the whole plant. *Functional Plant Biology*, 30(3), 239-264.
- Chevez, L., & de Jesús, M. (2016). Estudio comparativo de los tratamiento biológico y químico convencional en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) Variedad Jamapa.
- Chudnoff, M. (1984). Tropical timbers of the world (No. 607). US Department of Agriculture, Forest Service
- Flexas, J., & Medrano, H. (2002). Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. *Annals of Botany*, 89(2), 183-189.
- Flexas, J., Bota, J., Loreto, F., Cornic, G., & Sharkey, T. D. (2014). Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C3 plants. *Plant Biology*, 6(3), 269-279. <https://doi.org/10.1111/plb.2004>

- Fonnegra Carvajal, O. F. Evaluación del efecto de la aplicación de hongos micorrícicos sobre el crecimiento de plántulas de tamarindo (*Tamarindus indica* L.) en vivero en el occidente cercano antioqueño.
- Francis, J. K. (2000). *Ochroma pyramidale* Cav. balsa. de Silvics of Native and Exotic Trees of Puerto Rico and the Caribbean Islands, Río Piedras, US Department of Agriculture, 371-376.
- Francis, J. K. (2000). *Ochroma pyramidale* Cav. balsa. de Silvics of Native and Exotic Trees of Puerto Rico and the Caribbean Islands, Río Piedras, US Department of Agriculture, 371-376.
- Fuentes, R. L. A., & ARANGO, A. L. (2005). Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima. Ibagué Colombia. Corporación Autónoma Regional del Tolima CORTOLIMA y Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad deTolima.
- Fuentes, R. L. A., & ARANGO, A. L. (2005). Manual para la identificación de maderas que se comercializan en el departamento del Tolima. Ibagué Colombia. Corporación Autónoma Regional del Tolima CORTOLIMA y Facultad de Ingeniería Forestal de la Universidad del Tolima.
- Garcia, K., Delaux, P.-M., Cope, K. R., & Ané, J.-M. (2020). Molecular signals required for AM fungal colonization of plants. *Annual Review of Plant Biology*, 71, 361-390.
- Givnish, T. J. (1987). Comparative studies of leaf form: assessing the relative roles of selective pressures and phylogenetic constraints. *New phytologist*, 106, 131-160.
- Gómez-Romero, M., Lindig-Cisneros, R., & Val, E. D. (2015). Efecto de la sequía en la relación simbiótica entre *Pinus pseudostrobus* y *Pisolithus tinctorius*. *Botanical Sciences*, 93(4), 731-740.
- Gorai, M., Maraghni, M., & Neffati, M. (2010). Relationship between phenological traits and water potential patterns of the wild jujube *Ziziphus lotus* (L.) Lam. in southern Tunisia. *Plant Ecology & Diversity*, 3(3), 273-280.
- Habibzadeh, Y., Pirzad, A., Zardashti, M. R., Jalilian, J., & Eini, O. (2013). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on seed and protein yield under water-deficit stress in mung bean. *Agronomy Journal*, 105(1), 79-84.
- Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., & Chapagain, A. K. (2020). Water scarcity and drought: a growing concern. *Nature Sustainability*, 3(2), 91-99.
- IDEAM, P. N. U. D., & MADS, D. (2017). Resumen ejecutivo Tercera Comunicación Nacional de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Bogotá DC, Colombia.

- Kumar, A., Raza, K., & Singh, R. (2017). Physiological, biochemical and molecular insights of drought stress in plants: towards genetic improvement. *Plant Signaling & Behavior*, 12(5), e1330674.
- Marshall, R. C. (1939). *Silviculture of the trees of Trinidad and Tobago*.
- Muñoz Carrillo, M. G. (2018). Análisis de expresión de genes de respuesta al estrés hídrico en plantas de *Sorghum bicolor* (L) Moench en presencia y ausencia de asociaciones con hongos micorrícicos (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Aguascalientes).
- Noda, Y. (2009). Las Micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *Pastos y forrajes*, 32(2), 1-1.
- Ojeda, L., Furrázola, E., & Hernández, C. (2014). Micorrizas arbusculares en leguminosas de la empresa pecuaria El Tablón, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 37(4), 392-398.
- Oliveira, R. S., Carvalho, P., Marques, G., Ferreira, L., Nunes, M., Rocha, I., ... & Freitas, H. (2017). Increased protein content of chickpea (*Cicer arietinum* L.) inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi and nitrogen-fixing bacteria under water deficit conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(13), 4379-4385.
- Osorio, B. G., Fonseca, C. S., Navarrete, E. D. T., Simba, L., & Chancay, X. R. (2010). Caracterización del cultivo de balsa (*Ochroma pyramidale*) en la provincia de Los Ríos-Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 3(2), 7-11.
- Osorio, B. G., Fonseca, C. S., Navarrete, E. D. T., Simba, L., & Chancay, X. R. (2010). Caracterización del cultivo de balsa (*Ochroma pyramidale*) en la provincia de Los Ríos-Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 3(2), 7-11
- Pérez, A., ROJAS, J., & MONTES, D. (2011). Hongos formadores de micorrizas arbusculares: una alternativa biológica para la sostenibilidad de los agroecosistemas de praderas en el caribe colombiano. *Revista Colombiana de Ciencia Animal-RECIA3*, 3(2), 366-385.
- Poorter, H., Niinemets, Ü., Poorter, L., Wright, I. J., & Villar, R. (2009). Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): a meta-analysis. *New Phytologist*, 182(3), 565-588.
- Rodríguez, R., & Redman, R. (2008). More than 400 million years of evolution and some plants still can't make it on their own: plant stress tolerance via fungal symbiosis. *Journal of Experimental Botany*, 59(5), 1109-1114.
- Roveda, G., Cabra, L., Ramírez, M. M., & Peñaranda, A. (2007). Efecto de las micorrizas arbusculares sobre la aclimatación y endurecimiento de microplántulas de mora (*Rubus glaucus*). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 8(1), 28-36.

- Ruiz, P. O., Rojas, K. C., & Sieverding, E. (2011). La distribución geográfica de los hongos de micorriza arbuscular: una prioridad de investigación en la Amazonía peruana. *Espacio y Desarrollo*, (23), 47-63.
- Ruiz-Lozano, J. M., Aroca, R., & Bárzana, G. (2012). Micorrizas arbusculares y su efecto en la regulación del ácido abscísico y la tolerancia al déficit hídrico. *Annals of Botany*, 109(5), 1017-1027.
- Ruiz-Lozano, J. M., Aroca, R., & Zamarreño, Á. M. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi modulate plant responses to drought: new insights for sustainable agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, 36, 25.
- Sana, A. V. (2014). Microorganismos del suelo y biofertilización. *Crops for Better Soil. Life*, 10.
- Serna-Mosquera, Y. B., Torres-Torres, J. J., & Asprilla-Palacios, Y. Y. (2020). Durabilidad natural de la madera de *Ochroma pyramidale* Urb. en el municipio de Atrato, Colombia. *Entramado*, 16(1), 192-202.
- Smith, S. E., & Read, D. J. (2008). *Mycorrhizal Symbiosis* (3rd ed.). Academic Press.
- Smith, S. E., Jakobsen, I., Grønlund, M., & Smith, F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiology*, 156(3), 1050-1057.
- Tawaraya, K., & Turjaman, M. (2014). Use of arbuscular mycorrhizal fungi for reforestation of degraded tropical forests. In *Mycorrhizal Fungi: Use in Sustainable Agriculture and Land Restoration* (pp. 357-373). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Torres Valencia, D. (2010). Influencia de la fertilización con diferentes fuentes de fósforo en el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en el pacífico colombiano (Doctoral dissertation).
- van der Heijden, M. G. A., Martin, F. M., Selosse, M. A., & Sanders, I. R. (2015). Mycorrhizal ecology and evolution: The past, the present, and the future. *New Phytologist*, 205(4), 1406–1423.
- Vélez Zabala, F. J., & Sánchez de Prager, M. (2014). Dinámica de los hongos de micorriza arbuscular (MA) en un Humic Dystrudepts sembrado con maíz (*Zea mays* L.) y abonos verdes. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 5(1), 69–79.
- Venegas Tovar, L. (1978). Distribución de once especies forestales en Colombia.
- Whitmore, T. C., & WOOL-KHOON, G. O. N. G. (1983). Growth analysis of the seedlings of balsa, *Ochroma lagopus*. *New Phytologist*, 95(2), 305-311.

- Yanes, C. V., Munoz, A. B., Silva, M. A., Díaz, M. G., & Dirzo, C. S. (2001). Árboles y arbustos nativos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. *México DF, México: Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Zhang, H., Kim, M. S., Sun, Y., Dowd, S. E., Shi, H., & Paré, P. W. (2018). Soil bacteria confer plant salt tolerance by tissue-specific regulation of the sodium transporter HKT1. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 21(6), 737-744.

ANEXOS

Anexo 1. Secado de suelo al aire y Tamizado de suelo.



Fuente: Propia.

Anexo 2. Esterilizado de suelo en autoclave y Crecimiento de plántulas de baso en germinadores plásticos



Fuente: Propia.

Anexo 3. Muestra de raíces colectada de balso; Raíces y tallos de plantas colectadas separadas en bolsas de papel para secado en horno.



Fuente: Propia.

Anexo 4. Muestra de raíz de planta de balso; Muestra de raíces después de lavado con agua oxigenada más KOH al 10%.



Fuente: propia.