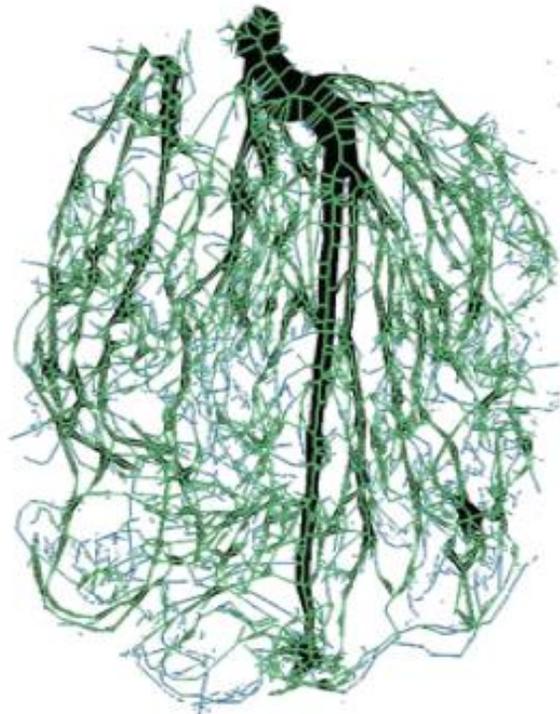
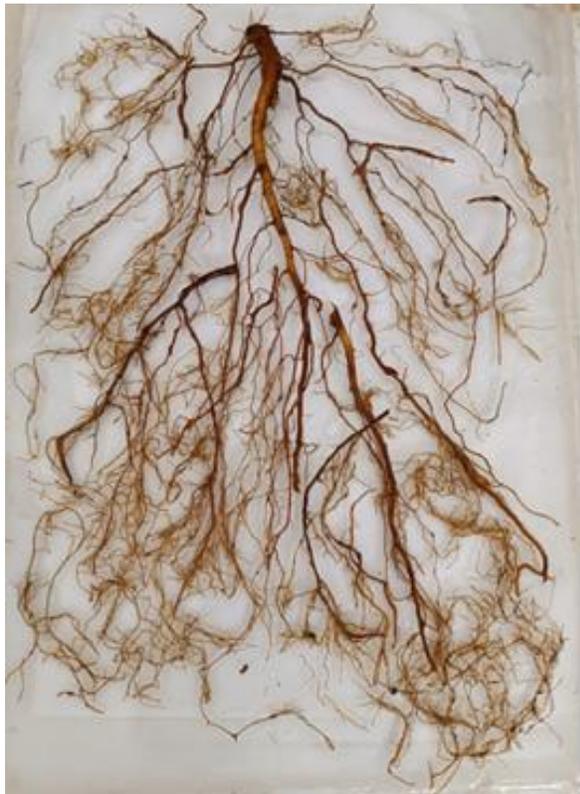


Estructura de la raíz en plantas de balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. Ex Lam.) Urb.) sometidas a estrés por sequía

Lisbeth Yulieth Ibarbo Carabalí  
Luis William Segura Palacios



Estructura de la raíz en plantas de balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. Ex Lam) Urb.) sometidas a estrés por sequía

Lisbeth Yulieth Ibarbo Carabali  
Luis William Segura Palacios

Trabajo de investigación presentado como requisito para optar al título de: Agrónomo

Director:  
PhD. Nilsen Leonardo Lasso Rivas

Línea de investigación:  
Conservación de suelos

Universidad del Pacífico  
Programa de Agronomía  
Buenaventura, Colombia  
2024

## DEDICATORIA

A mi madre; Aurora Ibarbo: la mujer que con su certeza me enseñó lo que es vivir, con su amor y sus consejos me dio el impulso para salir adelante. Siempre has sido una excelente madre y una buena amiga y aunque hubo momentos difíciles, siempre he contado con tu incondicional apoyo ante todo. Gracias a ti, hoy veo convertirse en realidad una de mis metas, ya que fomentaste en mí el deseo de superación y el anhelo del triunfo en la vida, te amo con mi vida mami, gratitud contigo siempre. A mi hija; Danna Lucia: el regalo más grande que Dios me supo entregar, una de la persona más importante de mi vida y la que me dio fuerza y motivos para luchar y salir adelante, para ti todo mi esfuerzo y dedicación, te amo con todo el corazón, vida mía. A mis hermanos; Laury, Diego, Cristian, Wendy y Karen: por sus buenos consejos, su gran apoyo, su presencia en muchos momentos importantes de mi vida, los amo. A mi compañero sentimental; Anderson Portocarrero: quien ha estado conmigo incluso en los momentos más turbulentos. Tu apoyo ha sido fundamental. Sabes que este proyecto no fue fácil, pero estuviste motivándome hasta donde tus alcances te lo permitían. Te amo y te lo agradezco muchísimo, amor mío. A mi amigo: Luis Fernando Cuero Mondragón (Q.E.D.): por apoyarme, ser leal y cuidarme. Un beso y un abrazo enorme hasta el cielo.

Lisbeth Yulieth Ibarbo Carabali.

De igual manera quero dedicar este trabajo a mis padres quienes han sido, son y seguirán siendo mi mayor motivación y mi mayor tesoro. A mis hermanos, los cuales amo y sobre todo son mis ganas de seguir cuando no siento motivos para continuar. Dedico este trabajo a la mujer más fuerte que he conocido a un pilar fundamental de una familia entera, a ti mami Rosa, eres y serás mi mayor inspiración. A ti mi Juli, a pesar que eres mi tía, siempre te he querido como mi hermana mayor, ere mi consuelo y la mujer que me ha brindado los mejores consejos aquello que me han llevado a ser lo que ahora soy. Finalmente dedico este trabajo a una persona que fue en su momento alguien especial y fundamental para que hoy en día tenga la dicha de decir que me gradué de la universidad y soy un profesional, Afra Marleny, también es para ti y tus padres, ustedes fueron quienes hicieron esto posible. Por último, el Ángel que Dios puso en mi camino, y que desde el día uno, siempre ha sido un apoyo incondicional, Javier Mosquera, a ti también te debo mucho, gracias por ser parte de este proceso.

Luis William Segura Palacios.

## **AGRADECIMIENTOS**

Le damos las gracias a Dios, quien ha sido nuestra guía y nos ha dado la fortaleza para vivir y poder seguir en este viaje disfrutado de cada estación de la vida.

A nuestro director Dr. Nilsen Leonardo Lasso Rivas, docente y tutor de este proyecto, muchísimas gracias por siempre brindarnos su apoyo incondicional durante todo este proceso, quien además demostró ser una persona muy paciente al compartir su gran conocimiento con nosotros, nuevamente muchísimas gracias por su valiosa colaboración con en el desarrollo de nuestra tesis.

A la universidad del pacifico y a cada uno de los docentes que de una u otra forma aportaron en nuestro proceso educativo.

A nuestros familiares que de una u otra fueron un apoyo incondicional para con nosotros.

A nuestro compañero Alberto Calimeño Valencia que participo en este hermoso proceso desde el día cero, muchísimas gracias por brindarnos su apoyo, fue incondicional.

Para concluir le damos gracias al coordinador de laboratorio, Javier Celis Viveros y los auxiliares de la misma por esa grata y excelente colaboración y compromiso durante todo el experimento. De igual manera a todos los compañeros y funcionarios que apoyaron de una manera directa e indirectamente.

## RESUMEN

El balsa (*Ochroma pyramidale*), cultivado para madera o reforestación en regiones tropicales y subtropicales, fue objeto de un estudio sobre el efecto de la sequía en su sistema radicular. Plantas de tres áreas con diferentes precipitaciones fueron sometidas a sequía moderada (50% de la capacidad de campo del suelo), sequía severa (20% C.C.) o condiciones normales. Se utilizaron imágenes del sistema radicular y se evaluaron varias variables morfológicas y de contenido de carbohidratos solubles totales. Contrario a lo esperado, el origen de las plantas no influyó significativamente en la morfología radicular. Sin embargo, la sequía sí tuvo un impacto significativo. Sorprendentemente, las plantas bajo sequía moderada mostraron mejores resultados que las del grupo control o las sometidas a sequía severa en todas las variables evaluadas. Este hallazgo sugiere una respuesta específica del balsa a diferentes niveles de estrés hídrico, desafiando las expectativas previas. Este estudio destaca la importancia de comprender las respuestas de las plantas a la sequía para informar prácticas de manejo forestal y de conservación en regiones afectadas por cambios climáticos.

**Palabras clave:** *estrés abiótico, fenotipado de raíces, topología de raíces, plasticidad fenotípica, especie pionera.*

## **ABSTRACT**

The balsa tree (*Ochroma pyramidale*), cultivated for timber or reforestation in tropical and subtropical regions, was the subject of a study on the effect of drought on its root system. Plants from three areas with different precipitation levels were subjected to moderate drought (50% of soil field capacity), severe drought (20% F.C.), or normal conditions. Root system images were used, and various morphological and total soluble carbohydrate content variables were evaluated. Contrary to expectations, the plants' origin did not significantly influence root morphology. However, drought did have a significant impact. Surprisingly, plants under moderate drought showed better results than those in the control group or subjected to severe drought in all evaluated variables. This finding suggests a specific response of balsa trees to different levels of water stress, challenging previous expectations. This study highlights the importance of understanding plant responses to drought to inform forestry management and conservation practices in regions affected by climate change.

**Keywords:** *Abiotic stress, root phenotyping, root topology, phenotypic plasticity, pioneer species.*

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	3
<b>2. JUSTIFICACIÓN</b> .....	4
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	5
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>4. MARCO TEÓRICO</b> .....	6
4.1 GENERALIDADES DE LA ESPECIE .....	6
4.1.1 Descripción botánica.....	6
4.1.2 Descripción taxonómica.....	6
4.1.3 Distribución y hábitat.....	6
4.1.4 Clima .....	7
4.1.3 Importancia económica .....	7
4.1.3 Usos.....	7
4.3.1 Respuestas de las plantas a la sequía .....	8
4.3.2 Impacto de la sequía en la estructura de las raíces.....	9
<b>5. DISEÑO METODOLÓGICO</b> .....	<b>11</b>
5.1 LOCALIZACIÓN.....	11
5.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN .....	11
5.3.1 Condiciones de crecimiento.....	11
5.3.2 Determinación de la humedad del suelo.....	11
5.3.3 Material vegetal.....	12
5.3.4 Diseño experimental.....	12
5.3.5 Parámetros evaluados .....	14
5.3.6 Pérdida de electrolitos.....	15
5.3.7. Carbohidratos solubles totales. ....	16
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>17</b>
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>24</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>25</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Montaje del experimento -----	12
<b>Figura 2.</b> Semillas de plantas de balsa utilizada para la siembra del experimento. -----	13
<b>Figura 3.</b> Raíz de balsa extendida sobre la bandeja de acrílico.-----	15
<b>Figura 4.</b> Imagen esqueletada del sistema radical de las raíces de plantas de balsa. Los pixeles del esqueleto se colorean con base en rangos de diámetro: azules con un diámetro menor que los verdes. -----	16
<b>Figura 5.</b> Scree plot con los componentes principales para las variables morfológicas de las raíces de las plantas de balsa sometidas a diferentes niveles de estrés por sequía.-----	17
<b>Figura 6.</b> Biplot del análisis de componentes principales.-----	18
<b>Figura 7.</b> Variables morfológicas de las raíces de balsa de tres localidades sometidas a tratamientos de sequía. -----	20
<b>Figura 8.</b> Variables morfológicas de las raíces de balsa de tres localidades sometidas a tratamientos de sequía. -----	21
<b>Figura 9.</b> Variables fisiológicas de las raíces de plantas de balsa a tratamientos de sequía. -----	21

## LISTA DE TABLAS

**Tabla 1.** Tratamientos de humedad evaluados en el crecimiento del balso ----- 13

**Tabla 2.** Resultados del análisis de varianza para las variables morfológicas y fisiológicas de las raíces de las plantas de balso. ----- 19

## INTRODUCCIÓN

El balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. Ex Lam.) Urb.) Es una especie que pertenece a la familia Malvaceae y se caracteriza por ser una planta pionera de crecimiento rápido. El balsa posee diversos usos industriales, también se emplea para la minimización de la erosión en regiones expuestas, la estabilización de suelo, y en procesos de restauración ecológicas de sitios que se encuentran degradados (Pinargote, 2019). A nivel mundial, su mayor productor es el Ecuador, país que durante años ha suplido la demanda a diferentes países del mundo como Estados Unidos, Alemania, China, Alemania, Dinamarca, Japón, y Brasil (Mera et al., 2020). El balsa se caracteriza por producir mucha hojarasca, la cual provoca que una gran cantidad de materia orgánica se almacene en el suelo de los lugares que donde crece la planta. En cuanto a los requerimientos climáticos, el balsa requiere de un clima cálido y húmedo con un promedio de precipitación de 1500mm por año (Parrales, 2012).

En los últimos años ha aumentado el interés por parte de la comunidad científica por estudiar los posibles impactos del cambio climático en la fisiología de especies vegetales de interés económico. Cuando se realizan estudios sobre los impactos de los factores ambientales sobre el crecimiento de las plantas, generalmente se analizan más los órganos aéreos que las raíces, y esto porque estas últimas son difíciles de observar, particularmente in situ, y los métodos tienden a ser laboriosos, imprecisos y difíciles de estandarizar en todos los experimentos (Jackson et al., 1997). Sin embargo, el estudio de las raíces puede aportar información bastante útil sobre la respuesta de las plantas a los factores ambientales, y es que los sistemas radicales son componentes clave de los ecosistemas forestales pues son responsables de la absorción de agua y nutrientes, proporcionan estabilización física, almacenan nutrientes y carbohidratos y proporcionan carbono y nutrientes al suelo a través del proceso de renovación de las raíces finas, por lo tanto, desempeñan un papel importante en el secuestro y el ciclo del carbono, además, las raíces pueden actuar como sensores de condiciones de déficit de agua y enviar señales a los brotes que se encuentran en la superficie. Uno de los factores de estrés ambiental que más puede influir en crecimiento de la planta es el estrés por sequía, en este sentido se han realizado múltiples investigaciones que tratan de determinar el efecto de este factor de estrés en el crecimiento de las raíces. Por ejemplo, en un estudio en que se evaluó la vida útil de las raíces bajo condiciones de (Chen y Brassard (2013) encontraron que esta no se veía influenciada por los tratamientos de sequía a los que eran sometidas las plantas. En otro experimento en el que se evaluó la producción de raíces finas bajo condiciones de sequía (Gaul et al. (2008) encontraron que la producción de raíces finas se estimulaba bajo condiciones de sequía leve mientras que la mortalidad de las mismas aumentaba bajo condiciones de sequía más intensas. En esta misma línea de investigación, Kuster et al. (2013) para un estudio con plántulas de roble reportaron una redistribución de la biomasa de raíces bajo condiciones de sequía y una reducción general de la biomasa total de las raíces como respuesta a este factor de estrés abiótico.

Aunque cada vez hay más pruebas de que la sequía puede influir en la estructura y el crecimiento de las raíces de los árboles, tanto gruesas como finas, las respuestas de las raíces de los árboles a la sequía y su papel en condiciones de sequía siguen sin estar claras y sólo se mencionan marginalmente o incluso se ignoran por completo en dichos exámenes (Kozlowski y Pallardy, 2002).

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El balsa es una especie forestal de rápido crecimiento utilizada no sólo por sus propiedades maderables, sino también por su utilidad para estabilizar el suelo y minimizar la erosión en regiones abiertas. Actualmente, el cambio climático es uno de los problemas ambientales más importantes que enfrentan los ecosistemas, pues uno de sus mayores impactos es el aumento en la frecuencia de eventos de estrés abiótico (Gorai, 2010). En ese sentido, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) pronostica para Colombia que para el año 2100 habrá un aumento de temperatura de 3,6°C, así como un aumento en la frecuencia de eventos de sequía en diversas regiones del país incluyendo la región Pacífico. Bajo este escenario especies forestales como el balsa podrían verse afectadas pues la sequía no solo afectaría el crecimiento de las plantas, sino que también podría hacerlas más susceptible al ataque de patógenos al verse comprometidos sus mecanismos de resistencia (Vera, 2019). En la actualidad no existe información acerca de la dinámica del crecimiento y estructura del sistema radical de plántulas de balsa crecidas bajo condiciones de déficit hídrico, es importante determinar si los sistemas radicales de estas plantas muestran algún tipo de respuesta adaptativa a este tipo de estrés.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Dado que el cambio climático supondrá un aumento en la frecuencia de eventos de estrés abiótico como la sequía, lo que representa una amenaza para la supervivencia de las plántulas de especies forestales como el balsa, hace que cobre importancia la identificación de las estrategias de crecimiento de las raíces de las plántulas, lo que está directamente relacionado con el desempeño de las mismas. Sin embargo, hasta el momento falta información esencial sobre como varían los rasgos morfofisiológicos de las raíces ni cómo dicha variación y plasticidad se relacionan con la intensidad y duración de la sequía y cómo influyen en la absorción de agua y la supervivencia de las plantas (Funk et al. 2017). Por lo anteriormente expuesto, es necesario determinar si existen diferencias en las respuestas al estrés por sequía (a nivel de rasgos morfológicos de las raíces) entre plántulas de balsa provenientes de localidades con diferentes regímenes de precipitación.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Identificar el efecto que tiene el estrés por sequía en la estructura del sistema radical de plantas de balsa (*Ochroma pyramidale*) provenientes de tres localidades con diferentes regímenes de precipitación.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar los rasgos morfológicos de los sistemas radicales de las plantas de balsa provenientes de tres localidades con diferentes regímenes de precipitación.
- Determinar las respuestas a nivel de la morfología de la raíz de plantas de balsa sometidas a condiciones de estrés por sequía.
- Identificar posibles diferencias adaptativas en la estructura del sistema radical de las plantas de balsa provenientes de tres localidades con diferencias en regímenes de precipitación.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 GENERALIDADES DE LA ESPECIE

“El balsa es una especie pionera que puede ser cultivada en plantaciones para su aprovechamiento maderable o para reforestación en bosques tropicales y subtropicales, especialmente en regiones ecuatoriales, es uno de los recursos forestales y madereros más utilizados “(Casanova, 2020).

#### 4.1.1 Descripción botánica.

El balsa puede alcanzar hasta 30 metros de altura, su tronco es liso y gris, su madera es extraordinariamente suave y ligera, lo que le da un interés especial para algunas industrias. Puede alcanzar 70 cm de diámetro. Las hojas son alternas y pecioladas, de 20-40 cm de largo y peludas, las flores blancas, grandes con forma acampanadas y cápsulas frutales (Rojas y Torres, 2009). Con semilla de forma esférica de 4 a 5 mm de diámetro rodeadas por una lana (Jiménez et al, 2017) el balsa tiene un follaje perennifolio y una floración que dura aproximadamente 6 meses, son solitarias, sus flores son hermafroditas, vistosas fragmentadas grandes de 10 -15 cm de largo y 7-9 de diámetro, con pétalos blanquecinos amarillo pálido con bordes marrón, las semillas llegan a germinar a los 8 días como promedio y muestran un 70% de germinación (Beihefte, 1920),

#### 4.1.2 Descripción taxonómica.

“Según Whitmore y Wooh-Khoom (1993) se presenta la siguiente clasificación: Reino: Plantae, división: Spermatophyta/Magnoliophyta, clase: Magnoliopsida, orden: Malvales, familia: Malvaceae, (Bombaceae), genero: *Ochroma*, especie: *pyramidale*. Nombre científico: *Ochroma pyramidale* “(Cav. Ex Lam.) Urb.

#### 4.1.3 Distribución y hábitat.

La especie se distribuye naturalmente desde el sur de México hasta Bolivia, Venezuela, Ecuador y las Antillas. También se ha importado y cultivado en India, Borneo, Fiji, Vietnam, Filipinas, Islas Salomón, Sri Lanka y Papua Nueva Guinea. (Macías, 2021). En Colombia, el balsa se puede encontrar en bosques húmedos de bajo crecimiento, alrededor de arroyos y en claros de bosques. Esta especie desempeña un papel clave en el ecosistema, incluida

la protección de los suministros de agua, ríos y arroyos, el control de la erosión y la protección de los hábitats de la vida silvestre y las plantas. La especie piramidal tiene importancia económica y ecológica en el suelo (Yuto), en los municipios de Chocón Atrato y Cértegui, donde suele encontrarse en superficies destruidas por minas (Venegas Tovar, Luis. 1978).

#### **4.1.4 Clima.**

Las temperaturas óptimas para el desarrollo fisiológico y productivo del balsa se encuentran en las zonas con rangos entre 22 y 26 grados Celsius, estas condiciones climáticas favorecen a la planta para su adaptación y crecimiento (Francis, 1991). Se dice que este árbol crece y se desarrolló de manera excelente en climas con abundante lluvia, de alrededor de 2.000 y 4.000 mm por año, pero pueden llegar a germinar con 800mm en los suelos fértiles y con niveles freáticos altos, puede desarrollarse perfectamente alturas sobre el nivel del mar de 500 a 1.000m (Álvarez, 2010).

#### **4.1.3 Importancia económica.**

El balsa es una especie forestal muy importante en un país como Ecuador, este país posee más de 20,000 hectáreas entre plantaciones entre bosques naturales y forestales que permiten cubrir la demanda nacional y ser el principal exportador de 80 a 90 % del volumen total siendo China el principal destino (García et al., 2017). A nivel económico las exportaciones de madera de balsa presentaron para Ecuador en el año 2020 alrededor de 70 millones de dólares americanos (García et al., 2017).

#### **4.1.3 Usos.**

Los productos que se obtienen del balsa incluyen la producción de chalecos salvavidas, tablas de surf y equipos para aeromodelismo, y también se utiliza en la construcción de modelos aéreos y arquitectónicos, aspas de ventiladores eólicos, canaletas, utilitarias, flotadores, esculturas. Así como artesanía, esculturas, letreros y lanzas. (Nieto y Rodríguez, 2010).

## 4.2 ASPECTOS AGRONÓMICOS

El proceso de siembra de balsa puede comenzar en el vivero, donde las semillas se siembran en una bandeja de germinación o bolsa de siembra llena con mezcla de siembra y cubierta con una fina capa de arena. La germinación ocurre dentro de los 5 a 6 días posteriores a la siembra. Para aumentar la germinación se pueden realizar varios tratamientos, como baño maría caliente por 20 minutos, baño maría hirviendo por 2 a 3 minutos, baño agua de coco por 12 horas, escarificación y quema. Una vez que la planta alcanza la altura media se realiza un seguimiento continuo para evitar ataques de plagas que puedan inhibir su crecimiento y desarrollo. Cuando las plántulas alcanzan una altura de unos 5 cm, se transfieren con cuidado a una bolsa de vivero. Se debe tener cuidado durante esta operación, ya que las plántulas se dañan fácilmente. Las plántulas comienzan a crecer a la sombra y gradualmente avanzan hacia pleno sol. Después de aproximadamente 4 meses de edad, las plántulas son lo suficientemente grandes (20 cm de alto) como para trasladarlas al campo (Marrero, 1949).

## 4.3 ESTRÉS POR SEQUÍA

El estrés hídrico se considera como la limitación para el crecimiento y el desarrollo óptimo de las plantas debido a la escasez de agua que se presenta cuando la transpiración excede el agua absorbida por las raíces, siendo esta la principal causa de muerte en las plantas (Swenson y Enquist, 2007;). El estrés hídrico también se puede definir como una condición causada por la alteración fisiológica de factores que tienden a romper el equilibrio en el estado hídrico de la planta (Cervera y Parra, 2009). Se dice que el déficit de agua provoca alteraciones en el metabolismo y la estructura celular, detención de la fotosíntesis y de reacciones catalizadas por enzimas (Jaeel et., 2009). Al presentarse un estrés por sequía en las plantas este se manifiesta por diferentes síntomas, a nivel morfológico: como la reducción de la altura de la planta, del diámetro del tallo, de la biomasa, expansión foliar, crecimiento de tallos y raíces. A nivel fisiológico se presentan: cierre estomático, disminución del potencial hídrico, pérdida de turgencia, disminución de la fotosíntesis y limitación del intercambio gaseoso (Bailey-Serres y Voesenek, 2008; Casierra y Gomez, 2008)

### 4.3.1 Respuestas de las plantas a la sequía.

La respuesta de la planta a la sequía puede ser una deformación o cambio físico (por ejemplo: rotura de membranas celulares, flujo citoplasmático, etc.) o una deformación química (por ejemplo: cambios en la síntesis de metabolitos). Por lo tanto, la resistencia al estrés en una planta se podría definir como la tensión necesaria para producir una

determinada deformación, y un valor que se suele utilizar como medida de resistencia al estrés, o el punto donde se produce la muerte de los individuos (Levitt 1980).

Las plantas pueden presentar diversas respuestas a la presencia del estrés por sequía, una de las más comunes es la modificación radical, ya que estas son de gran importancia para la adaptación de la planta en el ambiente que la rodea. Por lo tanto, puede presentar modificación de la estructura y distribución de la raíz en el suelo, (número de raíces laterales, cantidad de raíces en crecimiento, longitud de raíces). Esta modificación la planta la genera como respuesta al presentarse la sequía, debido a la limitación de recursos, las plantas deben canalizar sus recursos hacia las características que les permitan mayor eficiencia en su funcionamiento. Mediante condiciones de sequía se ocasiona una reducción significativa de la relación tallo/raíz, la mayoría de los autores interpretan esta respuesta como un mecanismo para mantener un mejor balance entre la capacidad de absorción de agua y la demanda de transpiración foliar (Costa Silva et al., 2004). Otra de las respuestas que genera la planta ante esta situación es la capacidad de generar una población de raíces en condiciones de sequía, ya que esta puede aumentar su probabilidad de supervivencias antes situaciones limitantes, (Modrzynski y Ericsson, 2002).

#### **4.3.2 Impacto de la sequía en la estructura de las raíces.**

Las raíces de las plantas desempeñan un papel importante en su crecimiento al explotar los recursos del suelo mediante la absorción de agua y nutrientes; los rasgos de las raíces, como el diámetro de las raíces finas, la longitud específica, el área específica, el ángulo y la densidad, se consideran rasgos útiles para mejorar el desempeño de las plantas durante condiciones de sequía (Wasaya, 2018). Y es que el déficit hídrico causado por la sequía puede relentecer el crecimiento de las raíces y reducir la cantidad de rizo deposición y exudación. La sequía también puede alterar la cantidad de raíces al alterar el contenido de suberina y lignina, dos compuestos claves que afectan la descomposición de las raíces, lo que podría influir en la transformación del material de las raíces en materia orgánica (Von Lutzow, 2006). La sequía puede alterar la vida útil de las raíces y acelerar su renovación (McCormack y Guo, 2014). Después de la muerte, las raíces finas aportan una cantidad de materia orgánica muerta al proceso de descomposición, y la materia orgánica derivada de las raíces juega un papel importante en el secuestro de carbono de los suelos forestales (Rasse et al., 2005). Sin embargo, en condiciones de déficit hídrico, las raíces muertas no se descomponen completamente y, en cambio, se transforman en un tipo de humus; el estrés hídrico de los árboles se manifiesta entonces como un daño fisiológico asociado con una serie de características, procesos y retroalimentaciones que pueden afectar la salud de los árboles en diversas escalas de tiempo. Una retroalimentación del estrés hídrico es la mortalidad prematura de las raíces o de los sistemas de raíces (Waring, 1987; Breda et al., 2006), lo que deja al árbol más vulnerable a la sequía el año siguiente.

En particular, el daño que limita la capacidad de un árbol para utilizar agua o nutrientes cuando vuelven a estar disponibles brevemente podría interactuar con sequías de varios años u otros factores estresantes para causar fallas en el sistema (Anderegg et al., 2013).

Como el suelo es una matriz heterogénea compleja, los rasgos plásticos de las raíces que involucran morfología, fisiología, y patrones de asignación de biomasa son fundamentales para el crecimiento de sistemas de raíces funcionales. Como respuesta a la sequía se han observado respuestas plásticas a nivel de rasgos fisiológicos de la raíz como el contenido de ácido abscisión y prolina, y rasgos morfológicos como la longitud específica, la profundidad, la relación raíz: tallo y la superficie de la raíz (Hanslin, 2019).

## **5. DISEÑO METODOLÓGICO**

### **5.1 LOCALIZACIÓN**

La presente investigación se realizó en el campus de la Universidad del Pacífico, ubicada en kilómetro 13 vía al aeropuerto barrio el Triunfo, Distrito Especial de Buenaventura, Valle del Cauca, coordenadas geográficas latitud 3° 50' Norte, longitud 79° 59' Oeste.

### **5.2 DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN**

Esta investigación fue de tipo experimental y consistió en evaluar el efecto del sitio de origen de las semillas (tres localidades con diferentes regímenes de precipitación) y la sequía (dos niveles de humedad de suelo más el control) en la morfología de raíces de plantas de balso. Las plantas fueron crecidas bajo condiciones semicontroladas en bolsas de polietileno de 5 kg de capacidad.

#### **5.3.1 Condiciones de crecimiento.**

Las semillas de balso se colocaron para su germinación en bandejas plásticas para germinación en las que permanecieron hasta la tercera semana después de germinar, pasado ese tiempo las plántulas se trasladaron a bolsas de polietileno negras de 5 kg, que contenían una mezcla de arena y una proporción 1:1. Estas plantas estuvieron bajo una estructura de tipo invernadero hecha de madera y plástico calibre 6 que impidió la caída de lluvia y permitía controlar el riego (Figura 1). Después del trasplante las plantas se mantuvieron con riego frecuente durante 60 días pasados los cuales se iniciaron los tratamientos de sequía durante 30 días, al finar ese lapso de tiempo las plántulas fueron cosechadas.

#### **5.3.2 Determinación de la humedad del suelo.**

Para determinar el porcentaje de humedad en la bolsa, se llenó con el sustrato y se pesó ( $p_1$ ), luego se saturó con agua y luego de dejarle escurrir el exceso por 24 horas, se tomó el peso para determinar el punto de capacidad de campo de la bolsa o ( $p_2$ ). Para obtener el volumen de agua para los tratamientos de 50% y 20% de humedad calculamos de la siguiente manera:  $(0,50 \times (p_2 - p_1))$ ,  $(0,20 \times (p_1 - p_2))$ .

**Figura 1.** Montaje del experimento



**Fuente:** *propia*

### 5.3.3 Material vegetal.

Las semillas utilizadas para el estudio se obtuvieron de los árboles de balsa también conocido como árbol plus (Figura 2), los sitios donde se hizo la recolección de las semillas fueron el corregimiento No. 8 del Distrito Especial de Buenaventura Valle del Cauca que corresponde a una precipitación pluvial anual de 6275 mm ( IDEAM, 2020), en el municipio de Santiago de Cali corresponde a una precipitación pluvial anual de 1482,8 mm y el corregimiento de Loboguerrero municipio de Dagua, Valle del Cauca que corresponde a una precipitación pluvial anual 850 mm.

### 5.3.4 Diseño experimental.

El presente fue un experimento de tipo factorial con la procedencia de la semilla y sequía como factores, con un diseño completamente al azar. El factor procedencia de la semilla tuvo tres niveles: Cali, Loboguerrero y Buenaventura; mientras el factor sequía contó con dos condiciones sequía: sequía moderada que correspondió a una humedad del suelo de 50% de la capacidad de campo del suelo en el contenedor (C.C.), sequía severa equivalente al 20% C.C. y el

control equivalente al 100% de CC. Para un total de 9 tratamientos con 6 repeticiones, 54 plantas en total (Tabla 1).

**Figura 2.** Semillas de plantas de balsa utilizada para la siembra del experimento.



**Fuente:** *propia*

**Tabla 1.** Tratamientos de humedad evaluados en el crecimiento del balsa

Tratamientos	Origen de la semilla	Humedad (% C.C.)
T1	Cali	100
T2	Buenaventura	100
T3	Loboguerrero	100
T4	Cali	20
T5	Buenaventura	20
T6	Loboguerrero	20
T7	Cali	50
T8	Buenaventura	50
T9	Loboguerrero	50

**Fuente:** *propia*

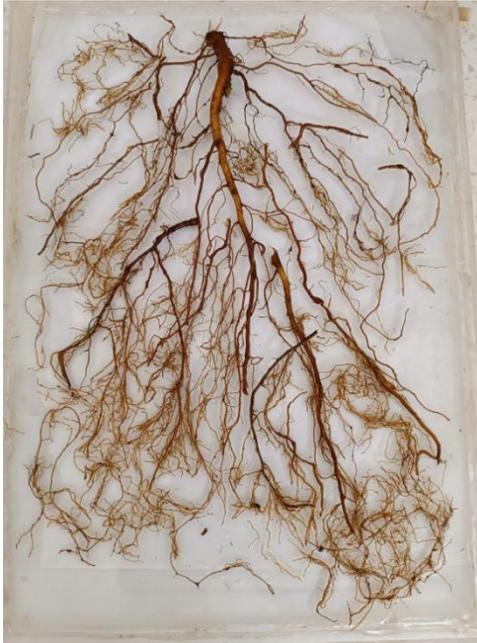
Para determinar la cantidad de agua a utilizar para cada tratamiento de sequía, primero se determinó el peso seco del suelo ( $p_1$ ) y luego se saturó con agua para luego dejar de escurrir el exceso de agua por 24 horas y llevarla al punto de capacidad de campo o ( $p_2$ ). Para obtener el volumen de agua para el tratamiento de 50% C.C. se utilizó la fórmula:  $0,50 \times (p_1 - p_2)$  y para el tratamiento de 20% C.C.:  $0,20 \times (p_1 - p_2)$ , para el control el riego se realizaba periódicamente. El riego para los tratamientos de sequía se realizaba cuando el suelo se veía seco y las plantas mostraban pérdida de la turgencia.

### 5.3.5 Parámetros evaluados

Al finalizar el experimento y realizar la cosecha de las plantas se separaron las raíces de la parte aérea, se tomaron muestras de las raíces para determinar el contenido de carbohidratos solubles totales. Se lavaron cuidadosamente las raíces, se extendió cada raíz sobre una bandeja de acrílico transparente y se tomaron fotos de las mismas (Figura 2), luego las raíces se colocaron en bolsas de papel y se pusieron a secar al horno por 48 horas a 70°C; finalmente, se determinó la masa seca de las muestras por medio de una balanza electrónica.

Las imágenes de las raíces se cargaron al programa RhizoVision Explorer, una vez cargada la imagen esta es transformada en una estructura esquelética donde los valores de los píxeles toman el valor calculado a partir del mapa de distancia para cada pixel y se lo utilizan para calcular el diámetro promedio de todas las raíces y para clasificar los segmentos de raíces en contenedores de diámetro (Figura 3). Posteriormente, RhizoVision identifica la topología de la raíz, lo que implica encontrar los puntos de ramificación topológicos, los puntos finales y los segmentos de raíz entre dos puntos de ramificación cualesquiera o un punto de ramificación y un punto final. Los puntos finales, serán las puntas de raíz, y se identifican como cualquier píxel esquelético que tiene solo un píxel vecino y los puntos de ramificación tienen 3 o 4 píxeles vecinos. Esta topología se almacena como una copia de la imagen esquelética donde los píxeles pueden tomar valores discretos que codifican el tipo, punta, punto de ramificación o segmento (Seethepalli et al., 2021). Finalmente, el software calcula una serie de parámetros relacionados con la topología de la raíz, en este caso se seleccionaron: número de puntas, número de ramificaciones, longitud de raíz, frecuencia de ramificaciones, área radical, diámetro promedio, diámetro mediana, diámetro máximo, volumen, área superficial, masa seca de la raíz y relación raíz/tallo, carbohidrato solubles totales.

**Figura 3.** Raíz de balsa extendida sobre la bandeja de acrílico.

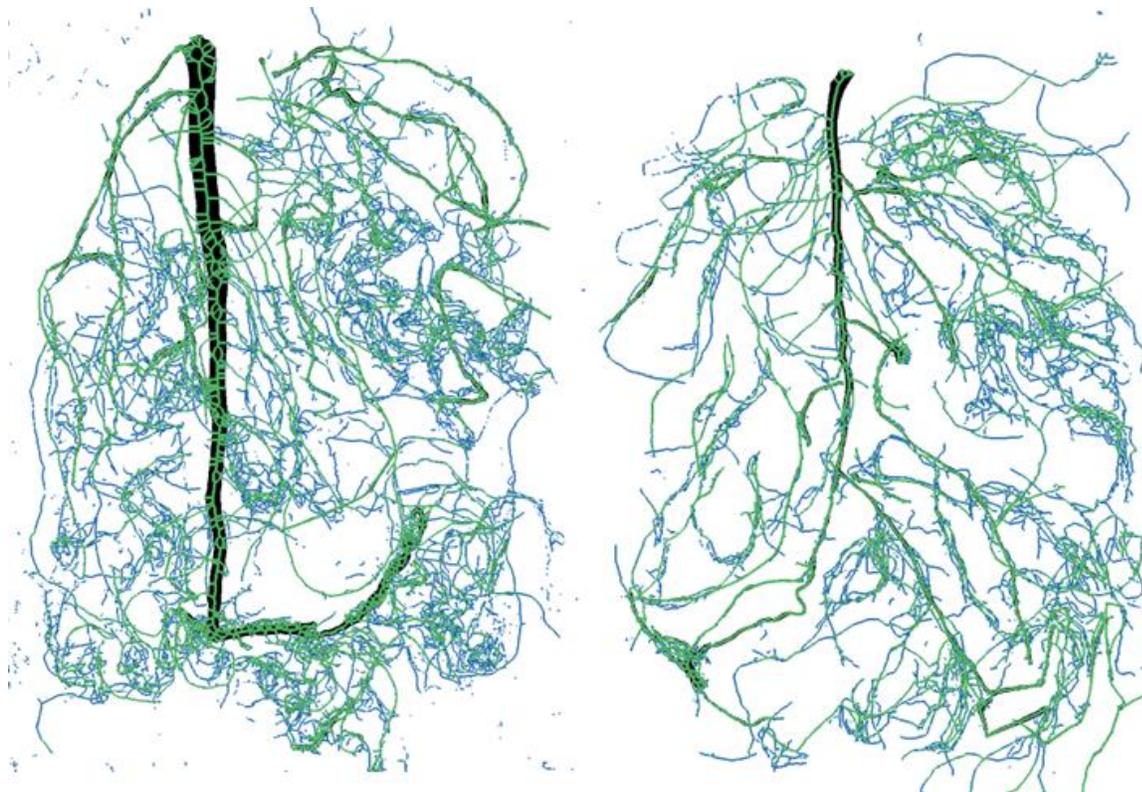


**Fuente:** *propia*

### 5.3.6 Perdida de electrolitos.

Este procedimiento se realizó tomando la metodología descrita y citada por Figueredo y Fraija (2017), el cual se realizó tomando segmentos de 2 cm de la raíz estos se dejaron en tubos Falcón de 15 ml con 10 ml de agua desionizada 20°C durante 2 horas, en este punto se tomó la conductividad eléctrica inicial (CEI) luego se llevó al baño maría por 15 minutos, se dejó enfriar a temperatura ambiente y luego se tomó la conductividad eléctrica final. (CEF) se calculó la pérdida de electrolitos usando  $(CIE/CFE)*100$ .

**Figura 4.** Imagen esqueletada del sistema radical de las raíces de plantas de balsa. Los pixeles del esqueleto se colorean con base en rangos de diámetro: azules con un diámetro menor que los verdes.



**Fuente:** *propia*

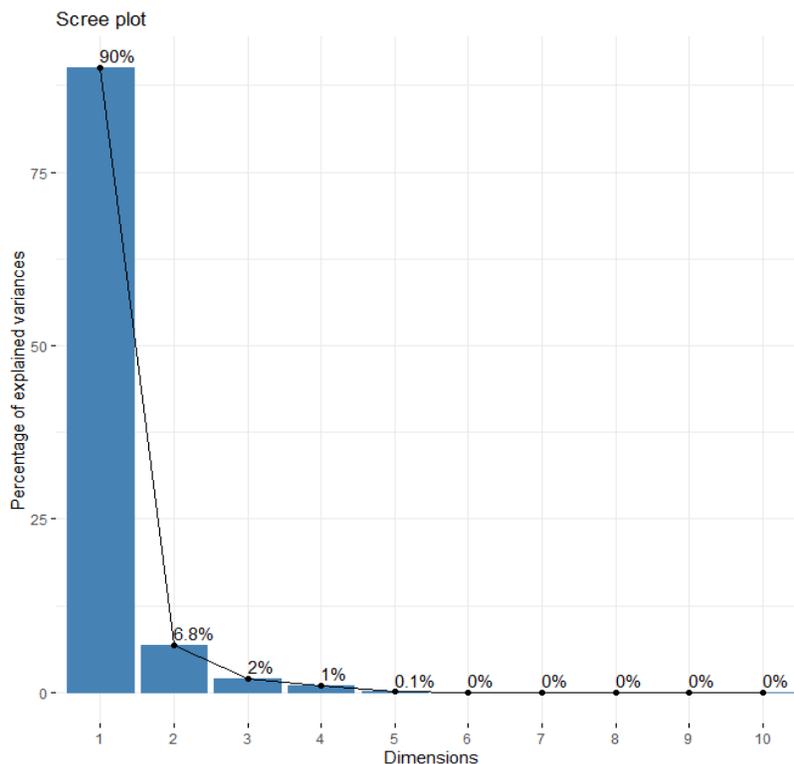
### 5.3.7. Carbohidratos solubles totales.

Este procedimiento se realizó utilizando 0,1 g, del tejido raíz que fueron macerados en mortero en 20 ml de etanol al 80%, después de ello se llevó a baño María hasta evaporar, seguido de esto, se recuperó en 50 ml de agua desionizada. Se tomó una alícuota de 19 ml en un tubo falcón y se centrifugó por 15 minutos a 5000 RPM, se tomó un 1 ml del sobrenadante y se añadieron 1 ml de hidróxido de potasio al 30% y 8 ml de una solución 1% de antrona en ácido sulfúrico, se agitó por 10 segundos y se tomó la lectura de la absorbancia a 625 nm. Se preparó una curva de calibración absorbancia vs. Concentración (mg/l) con las soluciones estándares de glucosa en etanol 80%.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Debido al alto número de variables morfológicas altamente correlacionadas que arroja el análisis del programa RhizoVision Explorer, se realizó un análisis de componentes principales con el objetivo de simplificar y estudiar las relaciones que existientes entre las variables evaluadas. El análisis de componentes principales indica que el primer componente principal (PC1) explica el 90% de la varianza total, lo cual implica que casi toda la información en los datos puede encapsularse en ese componente principal, el PC2 explica el 6,8% de la varianza, por lo que ambos componentes explicar un 96,8% de la varianza total (Figura 5). Para el PC1 las variables con mayor peso son número de puntas, número de ramificaciones, longitud de raíz, frecuencia de ramificaciones, mientras las de menor peso son área radical, diámetro promedio, diámetro mediana, diámetro máximo, volumen y área superficial. Para el PC2 las variables con peso son volumen, área superficial y diámetro promedio.

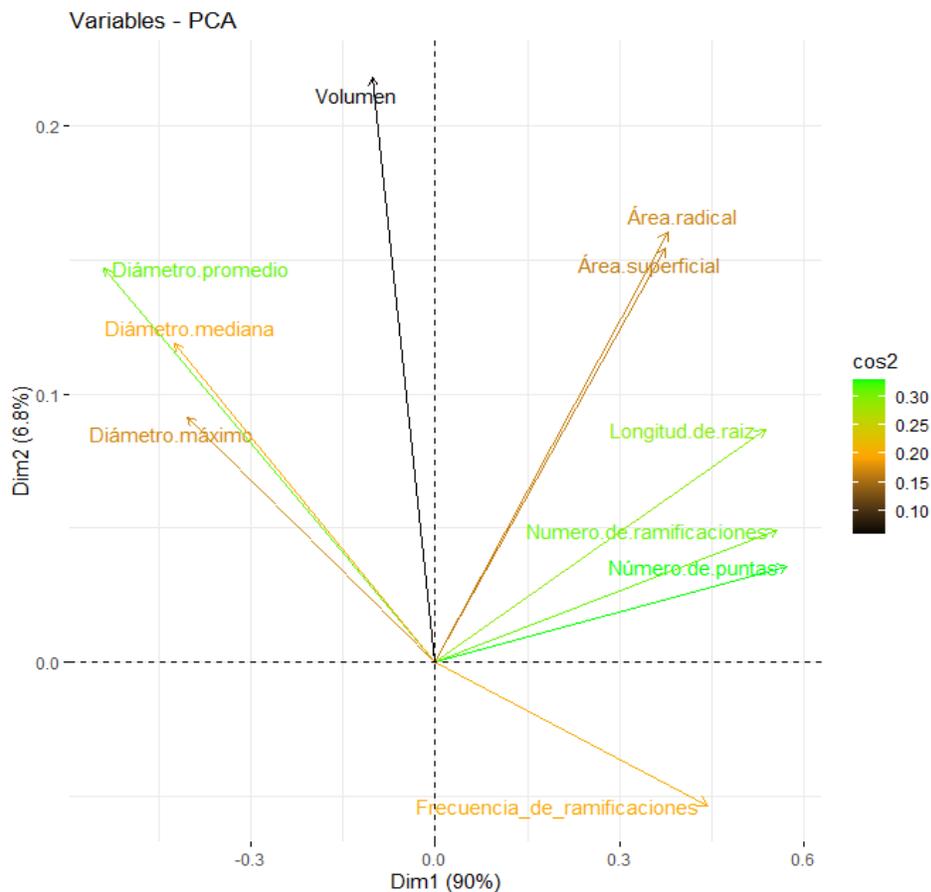
**Figura 5.** Scree plot con los componentes principales para las variables morfológicas de las raíces de las plantas de balsa sometidas a diferentes niveles de estrés por sequía.



**Fuente:** *propia*

La representación gráfica de los dos primeros componentes principales muestra como las variables de mayor peso en PC1 están altamente correlacionadas y es que a mayor número de ramificaciones se esperaría un mayor número de puntas y esto es de esperar en una raíz larga, el área radica y superficial son dos dimensiones correlacionadas, a mayor área de la raíz se espera una mayor área de superficie cubierta por este órgano. Por el contrario, el diámetro de la raíz es inversamente proporcional al número de ramificaciones pues se espera que una raíz gruesa tenga menos ramificaciones que una raíz fina. Por otra parte, el volumen de la raíz estaría más relacionado con el diámetro y el área que con la longitud o el número de puntas. Finalmente, la frecuencia de las ramificaciones sería ortogonal con todas las otras variables (Figura 6).

**Figura 6.** Biplot del análisis de componentes principales.



**Fuente:** propia

Los resultados del análisis de varianza indican que el factor localidad no tuvo efecto para ninguna de las variables evaluadas. En cuanto al factor humedad del suelo, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de humedad para todas las variables excepto para diámetro promedio, volumen y carbohidratos solubles totales (tabla 2). El ANOVA no halló interacción

entre los dos factores (tabla 2). Dado que los valores de pérdida de electrolitos resultaron ser poco confiables se decidió eliminarlos de los análisis.

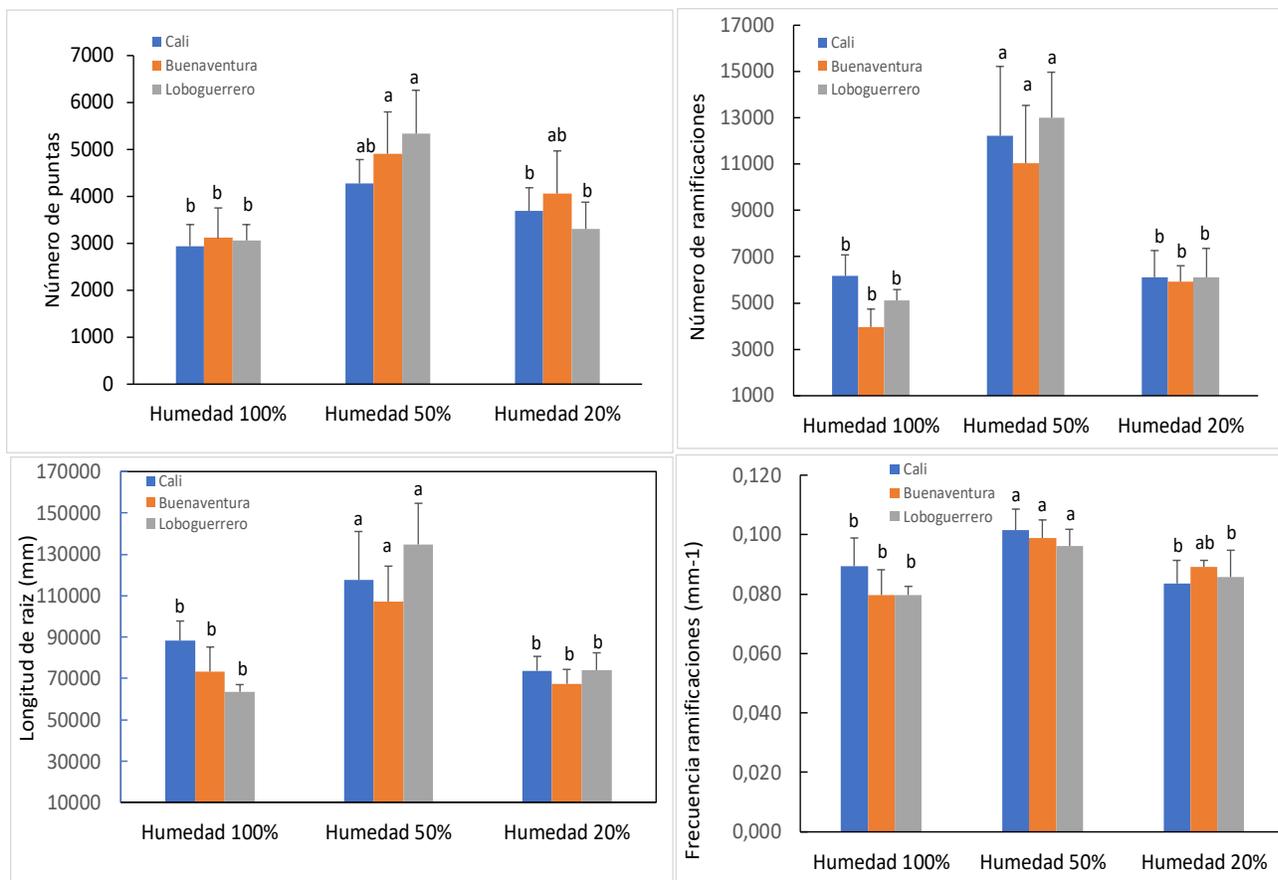
**Tabla 2.** Resultados del análisis de varianza para las variables morfológicas y fisiológicas de las raíces de las plantas de balso.

Parámetro	Localidad			Humedad			Localidad: Humedad		
	GI	F	Pr(>F)	GI	F	Pr(>F)	GI	F	Pr(>F)
Número de puntas	2	0,15	0,8589	2	6,05	0,0047 **	4	0,01	0,9997
Número de ramificaciones	2	0,18	0,8399	2	8,2	0,00093 ***	4	0,3	0,8474
Longitud de raíz	2	0,52	0,5969	2	7,3	0,0018 **	4	0,8	0,5312
Frecuencia de ramificación	2	0,22	0,805	2	4,4	0,019 *	4	0,5	0,735
Diámetro promedio	2	0,88	0,422	2	3,2	0,053	4	1	0,442
Máximo diámetro	2	0,12	0,89	2	5,4	0,0082 **	4	1,2	0,3243
Volumen	2	0,03	0,969	2	3,3	0,08	4	1,6	0,203
Área de superficie	2	0,31	0,733	2	4,1	0,022*	4	1,3	0,291
Carbohidratos raíz	2	1,07	0,35	2	2,3	0,11	4	0,4	0,81
Masa seca raíz	2	0,66	0,5208	2	6,8	0,0027 **	4	0,8	0,5485

**Fuente:** propia

El resultado de la prueba de separación de medias muestra que, para la variable número de puntas, las raíces de la humedad del 50% C.C. presentaron en promedio un valor más alto que las raíces de 100% CC y 20% CC. (Figura 8), es decir que existen mayor número de puntas cuando la raíz se encuentra en una humedad de 50 % C.C. Llama la atención que no hubo diferencias entre las raíces de del 100% CC y 20%CC. La separación de medias indica un patrón similar al anteriormente descrito para las variables número de ramificaciones, longitud de raíz y frecuencia de ramificaciones. Para todas estas variables las raíces del tratamiento del 50% CC presentaban valores más altos que las raíces de los tratamientos control y 20% C.C. (Figura 8).

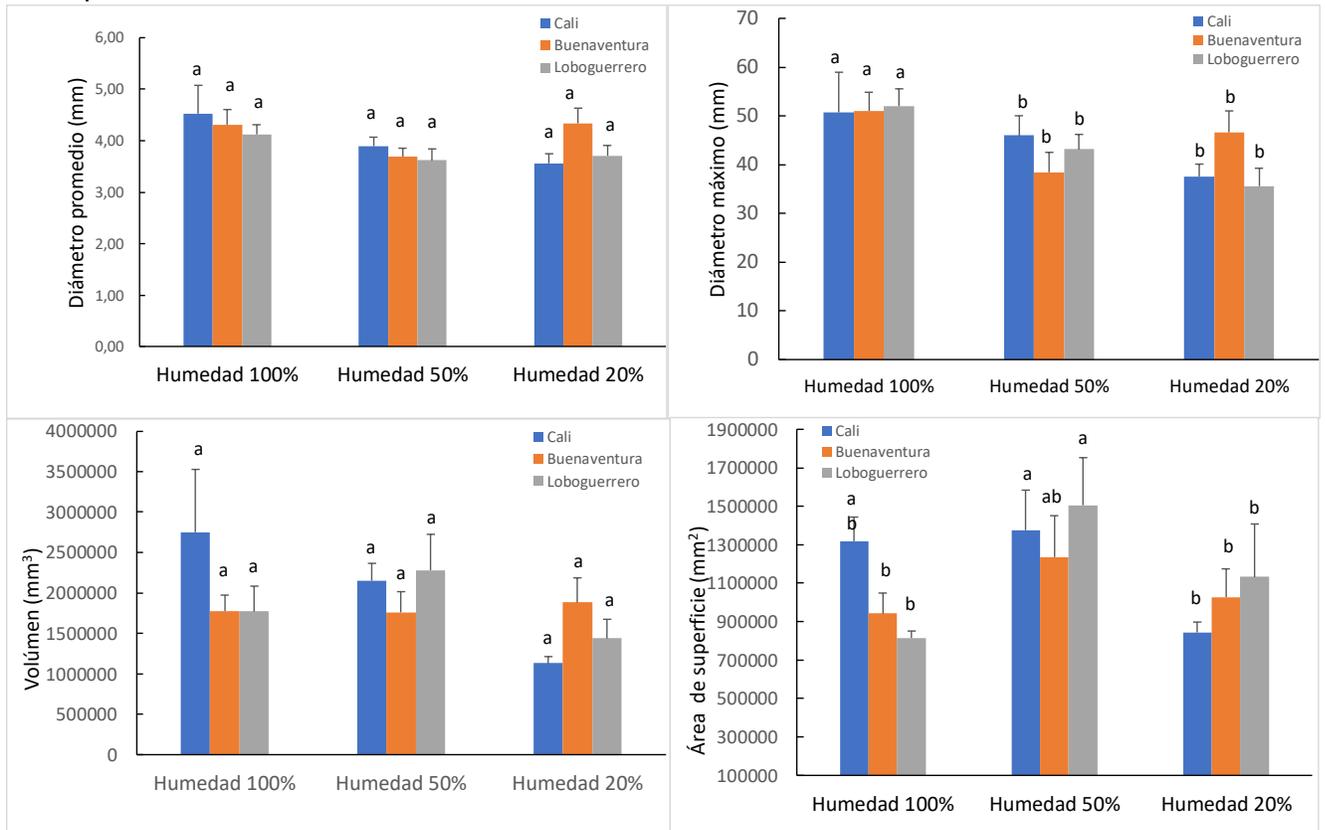
**Figura 7.** Variables morfológicas de las raíces de balso de tres localidades sometidas tratamientos de sequía.



Fuente: *propia*

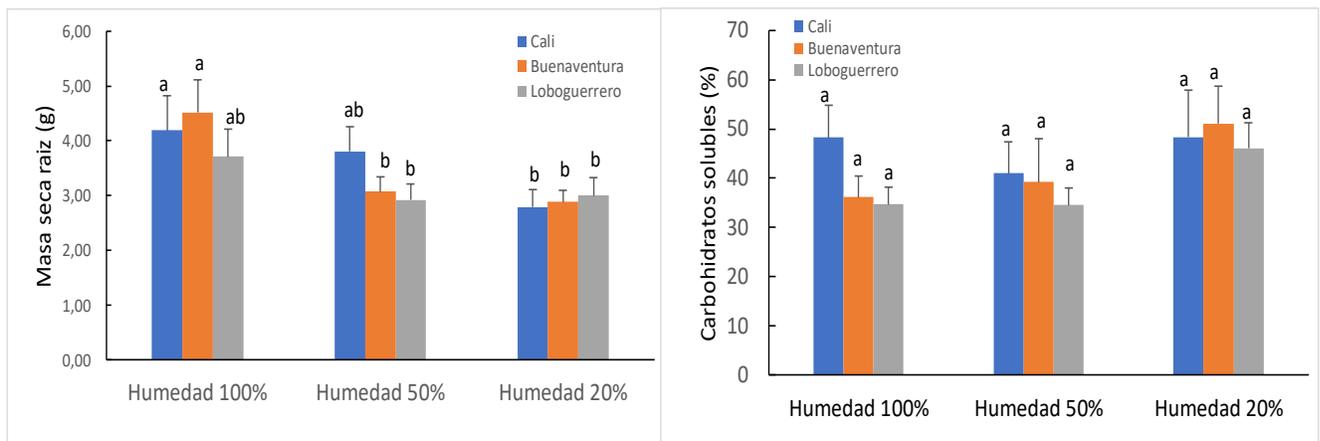
Para las variables diámetro promedio, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, igual sucedió para la variable volumen. En el caso de las variables diámetro máximo la prueba de Tukey muestra que hubo diferencias entre las plantas de control, que presentaron valores más altos que las plantas de los tratamientos de sequía (Figura 9).

**Figura 8.** Variables morfológicas de las raíces de balso de tres localidades sometidas tratamientos de sequía.



Fuente: *propia*

**Figura 9.** Variables fisiológicas de las raíces de plantas de balsos tratamientos de sequía.



Fuente: *propia*

Los resultados aquí presentados indican que el lugar de proveniencia de las plantas no tiene efecto sobre la morfología de las raíces de las plantas, no existió interacción con la respuesta de las plantas a los tratamientos de sequía, por lo que se descarta algún tipo de respuesta adaptativa a las diferentes condiciones de precipitación de los sitios escogidos. En la literatura se reporta que las especies de hábitats méxicos e hídricos muestran un alto grado de plasticidad de las raíces, con asignación dinámica de biomasa a las raíces con el fin de capturar nutrientes o absorber agua tanto en capas de suelo superficiales o profundas. Por el contrario, a menudo se observa que las especies adaptadas a condiciones más secas presentan sistemas radicales con menos plasticidad y por tanto existe una relación negativa entre la tolerancia a la sequía y la plasticidad de las raíces (Bristiel et al., 2019). En este caso, se esperaba que las plantas de Buenaventura, por ser una localidad de alta pluviosidad, presentaran algún grado de plasticidad de las raíces, y se diferenciaron de aquellas de Loboguerrero por ser de una localidad de baja precipitación pluvial.

Por otra parte, el factor sequía si afecto la morfología de las raíces, sin embargo, los resultados mostraron un patrón extraño pues no hubo diferencias significativas entre las plantas del control y las sometidas a sequía severa, y es que los estudios sobre la morfología del sistema radical, patrones de ramificaciones y desarrollo temporal de raíces hacen referencia a que las condiciones espacio temporales limitar la formación en nuevas raíces (Eissenstat et al., 2000, Porent al., 2000; Krause y Morin, 2005) usualmente el efecto de la sequía es la disminución en la formación de raíces finas (Yin, 1989). En este caso las plantas de sequía media mostraban raíces más largas, con más ramificaciones, número de puntas con la consecuente mayor área de superficie. Con relación a estos resultados algunos investigadores reportan que es posible que plantas que crecen en humedad baja puedan tener raíces más largas que aquellas que crecen bajo humedad optima pues las raíces en presencia de sequía buscan profundizar buscando el agua (Polania et al., 2012) en este caso la sequía media induciría la respuesta de tener raíces más largas pero esta respuesta no sería posible en plantas de sequía severa. Estos resultados indicarían que las plantas de balsa no presentan una estrategia fija de crecimiento en relación a la disminución de la disponibilidad hídrica, lo que está acorde con su característica de no ser una especie de condiciones secas; así pues, el balsa es una especie que posee cierta capacidad de ajustar los rasgos morfológicos de la raíz. Vale la pena mencionar que la ontogenia de las plántulas puede limitar la plasticidad fenotípica de las raíces (Kitajima y Myers, 2008), por este motivo sería necesario realizar este estudio de forma dinámica en la cual se tomen mediciones de las raíces durante el tiempo de manera que sea posible determinar posibles cambios en la plasticidad de las raíces en etapas más tempranas o tardías de crecimiento.

Por otra parte, el que no hubiese efecto de los tratamientos en el porcentaje de carbohidratos solubles indica que, a nivel de la raíz, la sequía no induce modificaciones

en el metabolismo de los carbohidratos solubles. La literatura muestra la acumulación de carbohidratos soluble se expresa como respuesta a condiciones de sequía (Myers, 1988).

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Contrario a las expectativas, el lugar de proveniencia de las plantas de balsa no mostró tener un efecto significativo en la morfología de las raíces. Esto sugiere que, a pesar de las diferencias en los regímenes de precipitación entre las localidades, las respuesta a la sequía a nivel de características del sistema radical no se ven modificadas. de las plantas de balsa no están determinadas por su origen geográfico.

Se observó que el factor de sequía tuvo un efecto significativo en la morfología de las raíces de las plantas de balsa. Sin embargo, las plantas sometidas a sequía media mostraron mayores valores en todas las variables evaluadas. Los resultados fueron inesperados, ya que no hubo diferencias significativas entre las plantas del grupo control y aquellas sometidas a sequía severa. En cambio, las plantas sometidas a sequía media mostraron mayores valores en todas las variables evaluadas. Este patrón indica una respuesta particular de las plantas de balsa a diferentes niveles de estrés hídrico.

El que no hubiese efecto de los tratamientos en el porcentaje de carbohidratos solubles indica que, a nivel de la raíz de las plantas de balsa, la sequía no induce modificaciones en el metabolismo de los carbohidratos solubles.

Dado el patrón inesperado observado en la respuesta de las plantas de balsa a diferentes niveles de sequía, se recomienda realizar investigaciones adicionales para comprender los mecanismos subyacentes que pueden estar influyendo en esta respuesta. Esto podría incluir estudios sobre la fisiología y la bioquímica de las raíces de las plantas de balsa bajo estrés por sequía.

Además de la sequía, es importante considerar cómo otros factores ambientales podrían interactuar con el estrés hídrico y afectar la morfología del sistema radical de las plantas de balsa. Por ejemplo, estudios adicionales podrían investigar la influencia de la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y la intensidad lumínica en estas respuestas.

Comprender cómo las plantas de balsa responden al estrés por sequía es crucial para la conservación y la restauración de los ecosistemas donde esta especie juega un papel importante. Se recomienda evaluar las implicaciones de los hallazgos de esta investigación para el manejo de áreas afectadas por la sequía y para el diseño de estrategias de restauración que promuevan la resistencia de las plantas de balsa a este tipo de estrés.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, Coral Juan. (2010). Metodología de la investigación Documental. México. EDAMEX.
- Anderegg, L. D. L., Anderegg, W. R. L., and Berry, J. A. (2013). Not all droughts are created equal: translating meteorological drought into woody plant mortality. *Tree Physiol.* 33, 701–712. doi: 10.1093/treephys/tpt044
- Bailey-Serres, J., and L.A.C.J. Voesenek. (2008). Flooding stress: acclimations and genetic diversity. *Annu. Rev. Plant Biology* 59:313-339
- Brunner, I. y Godbold, DL (2007). Raíces de los árboles en un mundo cambiante. *J. Para. Res.* 12, 78–82. doi: 10.1007/s10310-006-0261-4
- Casanova Muñoz, W. J. (2020). *Variaciones morfológicas de Tectona Grandis Lnn. F.(teca), Ochroma Pyramidale Cav. Ex Lam. (Balsa) y Gmelina Arborea Roxb (melina) por efecto de PH del suelo en etapa de vivero* (Master's thesis, Quevedo-Ecuador).
- Casierra, P.F., y N.E Gómez. (2008). Crecimiento foliar y radical en plantas de fique (*Furcraea castilla* y *F. macrophylla*) bajo estrés por encharcamiento. *Agronomía Colombiana* 26(3):381-387
- Cervera, C., and V. Parra. (2009). Seed germination and seedling survival traits of invasive and non-invasive congeneric *Ruellia* species (Acanthaceae) in Yucatan, Mexico. *Plant Ecol.* 205:285–293.
- Chen, HYH y Brassard, B.W. (2013). Controles intrínsecos y extrínsecos de la vida útil de las raíces finas. *Crítico. Rev. Ciencia vegetal.* 32, 151–161. doi: 10.1080/07352689.2012.734742
- Chiatante, D., A. Di Ioro, S. Sciandra, SG, Scippa y S. Mazzoleni. 2006. Efecto de Ecología y gestión forestal 165:105116.
- Costa e Silva, F., A. Shvaleva, J. Maroco, M. Almeida, M. Chaves y J. Pereira. (2004). Respuestas al estrés hídrico en dos clones de *Eucalyptus globulus* que difieren en la sequía tolerancia. *Fisiología de los árboles* 24:11651172.
- Eissenstat, DM, CE Wells, RD Yanai y JL Whitbeck. (2000). Construyendo raíces en un Entorno cambiante: implicaciones para la longevidad de las raíces. *Nuevo fitólogo* 147: 3342
- Figueredo, F. G., & Fraija, J. P. (2017). Efecto del estrés por anegamiento en el estado de floración de cinco variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en diferentes parámetros fisiológicos (Artículo científico). Obtenido de Researchgate - Universidad nacional de Colombia. Bogota, Colombia: [https://www.researchgate.net/publication/322508607\\_Efecto\\_del\\_es](https://www.researchgate.net/publication/322508607_Efecto_del_es)

- tres\_por\_anegamiento\_en\_el\_estado\_de\_floracion\_de\_cinco\_variedades\_de\_frijol\_Phaseolus\_vulgaris\_L\_en\_diferentes\_parametros\_fisiologicos
- Francis, J. (1991). *Ochroma pyramidale* Cav. Balsa. (En línea). Consultado el 11 de diciembre del 2018. Disponible en: <https://rngr.net/publications/arboles-de-puertorico/ochroma-pyramidale/>
- Funk JL, Larson JE, Ames G, Butterfield B, Cavender-Bares J, Firn J, Laughlin DC, Sutton-Grier A, Williams L, Wright J. (2017). Revisiting the holy grail: using plant functional traits to understand ecological processes. *Biol Rev* 92:1156–1173.
- García Olivares. (2009). Arnulfo Arturo: Recomendaciones tácticooperativas para Implementar un programa de Logística Inversa, editado por EUMED. Net. México.
- García Pinargote, J. A. (2019). *Influencia de las actividades mineras sobre la cobertura vegetal dentro de la concesión río Santiago, cantón Eloy Alfaro y San Lorenzo, provincia de Esmeraldas* (Bachelor's thesis).
- Gaul. (2008). Efectos de la sequía experimental en el sistema de raíces finas de la picea madura.
- 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
- Hanslin, H. M., Bischoff, A., & Hovstad, K. A. (2019). Root growth plasticity to drought in seedlings of perennial grasses. *Plant and Soil*, 440, 551-568. *J. Soil Sci.* 57, 426–445. doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x
- Jackson, RB, Mooney, HA y Schulze, E.D. (1997). Un presupuesto global para biomasa de raíces Finas, área de superficie y contenido de nutrientes. *Proc. Nacional. Acad. Ciencia. Estados Unidos* 94, 7362–7366. Doi: 10.1073/pnas.94.14.7362.
- Jaleel, C.A., P. Manivannan, A. Wahid, M. Farooq, R. Somasundaram, and R. Panneerselvam. (2009). Drought stress in plants: a review on morphological characteristics and pigments composition. *Int. J. Agric. Biol.* 11:100–105.
- Jiménez, E., & Garcías, L. (2017). *Germinación y crecimiento de Ochroma pyramidale (Cav. ex Lam.) Urb. en Ecuador*. Trujillo.
- Kitajima K, Myers, J.A. (2008). Seedling ecophysiology: strategies toward achievement of positive net carbon balance. *Seedling Ecology and Evolution* (eds M.A. Leck, T. Parker & R.L. Simpson), pp. 172–188. Cambridge University Press.

- Kozlowski, T.T y Pallardy, S.G. (2002). Aclimatación y respuestas Adaptativas de plantas leñosas al estrés ambiental. *Bot. Apocalipsis* 68, 270–334. Doi: 10.1663/00068101(2002)068[0270:AAAROW]2.0.CO;2.
- Kuster, TM, Arend, M., Günthardt-Goerg, M. y Schulin, R. (2013). Crecimiento de raíces de diferentes procedencias de robles en dos suelos bajo estrés por sequía y condiciones de calentamiento del aire. *Suelo vegetal* 369, 61–71. doi: 10.1007/s11104-012-1541-8 La sequía y el fuego sobre el desarrollo de las raíces en *Quercus pubescens* Willd. y *Fraxinus ornus* L. plántula. *Botánica Ambiental y Experimental* 56: 190197.
- Levitt, J. (1980). *Respuestas de las plantas al estrés ambiental*. Prensa académica, Nueva York, NY.
- Macias Castro, B. K. (2021). *Efectos de tres tipos de sustratos en el crecimiento inicial de Ochroma pyramidale (Cav. ex Lam.) Urb.(balsa) a nivel de vivero* (Bachelor's thesis, Quevedo: UTEQ).
- Marrero, J. (1949). Tree seed data from Puerto Rico. *Caribbean Forester*, 10(1), 11-35.
- Marschner, B., et al. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils:
- McCormack, ML y Guo, D. (2014). Impactos de los factores ambientales en la vida útil de las mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *Eur.*
- Mera, Ibarra, Menéndez y Menéndez. (2020). Análisis de los niveles de automatización de la empresa produciembal Cia. Ltda. *Journal of Business and entreprene*, 110.
- Modrzynski, J. y G. Ericsson. (2002). Respuesta de las poblaciones de *Picea abies* desde altitudes transectos en las montañas polacas de los Sudetes y los Cárpatos para simular el estrés por sequía.
- Myers, B. J. (1988). Water stress integral a link between short term stress and long term growth. *Tree Physiology*, 4, 315-323.
- Nieto, V. M., Rodriguez, J. (2010). *Ochroma lagopus* Sw. En: Manual de Semillas de Árboles Tropicales. USDA: J. V. Vozzo. Obtenido de <http://www.ecobalsa.com>.
- Nieto, V.M., Rodriguez, J. (2010). *Ochroma lagopus* Sw. En: Manual de Semillas de Árboles Tropicales. USDA: J. V. Vozzo. Obtenido de <http://www.ecobalsa.com>.
- Parrales Figueroa, G. C. (2012). Establecimiento de parcelas de balsa (*Ochroma pyramidale*) con la aplicación de cuatro dosis de riego (Bachelor's thesis, Jipijapa. Unesum). Raíces finas. Frente. *Ciencia vegetal*. 5:205. Doi: 10.3389/fpls.2014.00205.

Polania, J.A., Rao, I.M., Mejía, S., Bee, S. y Cajiao, C. (2012). Características morfofisiológicas de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) relacionadas con la adaptación a sequía. *Acta Agronómica*, vol. 61, núm. 3, 2012, pp. 197-206. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado d <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169925865001.pdf>.

Rasse, D. P., Rumpel, C., & Dignac, M. F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and soil*, 269(1), 341-356.

#### Resumen Ejecutivo Escenarios de Cambio Climático.pdf

Seethepalli, A., Dhakal, K., Griffiths, M., Guo, H., Freschet, G. T., & York, L. M. (2021). RhizoVision Explorer: open-source software for root image analysis and measurement standardization. *AoB plants*, 13(6), plab056..

Swenson, N.G., and B.J. Enquist. (2007). Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its communitywide variation across latitude and elevation. *American Journal of Botany* 94(3):451–459

Venegas Tovar, Luis. (1978). Distribución de once especies Forestales en Colombia. Papel Informativo Forestal 11. Bogotá, Colombia: Food and Agriculture Organization Of the United Nations. 74 p.

Vera Maldonado, P. R. (2019). Efectos fisiológicos y moleculares de *Ochroma pyramidale* (BALSA) sometidas a estrés hídrico (Bachelor's thesis, Quevedo-UTEQ) versity. *Annu. Rev. Plant Biology* 59:313-339.

Von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Waring, R. H. (1987). Characteristics of trees predisposed to die. *Bioscience* 37.

Wasaya, A., Zhang, X., Fang, Q., & Yan, Z. (2018). Root phenotyping for drought tolerance: a review. *Agronomy*, 8(11), 241.

Yin, X., JA Perry y RK Dixon. (1989). Dinámica de raíces finas y distribución de biomasa en un Ecosistema de *Quercus* después de la cosecha. *Ecología y Gestión Forestal*. 27: 159177.