



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

T E S I S

BIOMASA Y CARBONO EN RAÍCES Y HOJARASCA EN
SUELOS DE BOSQUE DE *Abies religiosa* (Kunth Schltl. et Cham.)
DEL PARQUE NACIONAL EL CHICO, HIDALGO

Para obtener el grado de

Doctora en Ciencias Ambientales

PRESENTA

Ing. Nancy Manzur Chávez

Director

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Codirector

Dr. Ramón Razo Zárate

Pachuca de Soto, Hidalgo, México, junio, 2025



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

T E S I S

BIOMASA Y CARBONO EN RAÍCES Y HOJARASCA EN
SUELOS DE BOSQUE DE *Abies religiosa* (Kunth Schltdl. et Cham.)
DEL PARQUE NACIONAL EL CHICO, HIDALGO

Para obtener el grado de

Doctora en Ciencias Ambientales

PRESENTA

Ing. Nancy Manzur Chávez

Director

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Codirector

Dr. Ramón Razo Zárate

Comité tutorial

Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval

Dr. Pablo Octavio Aguilar

Dr. Miguel Ángel Rico Rodríguez

Pachuca de Soto, Hidalgo, México, junio, 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo. a 19 de junio de 2025

Número de control: ICBI-D/996/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UA EH

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado a la **Ing. Forestal Nancy Manzur Chávez**, alumna del Doctorado en Ciencias Ambientales (Directo) con número de cuenta **230191**, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "**Biomasa y carbono en raíces y hojarasca en suelos de bosque de *Abies religiosa* (Kunth Schitdl. et Cham.) del Parque Nacional El Chico, Hidalgo**" en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE	Dr. Pablo Octavio Aguilar	
SECRETARIO	Dr. Otilio Arturo Acevedo Sandoval	
1 ^{er} VOCAL	Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna	
2 ^{do} VOCAL	Dr. Miguel Ángel Rico Rodríguez	
3 ^{er} VOCAL	Dr. Ramón Razo Zárate	
1 ^{er} Suplente	Dra. Claudia Romo Gómez	

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
 "Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
 Director del ICBI

ORIGINAL


 Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tehuacan Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
 direccion_icbi@uaeh.edu.mx, vergara@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

DEDICATORIA

A mi ARLET Xareni, mi amada hija, que con tu dulzura y sonrisas alegras cada instante, por motivarme día con día con tu gran espíritu aventurero e inmensa alma.

A mi mami, HORTENCIA, por tu amor, abrazos, palabras de aliento e impulsarme a seguir.

A mi papi, EUSEBIO, que forjaste en mí perseverancia, honestidad y que todo es posible.

A mis hermanitas, LUNA y ANGÉLICA, a mi sobrina ALONDRA, mis compañeras de vida, de travesuras, de alegrías, mis adoradas chaparras.

A mis tíos ESTELA y JOEL, a mis primos FANNY y JOELITO, por creer en mí y ayudarme incondicionalmente.

A mi amiga, ANA, por estar, por tus palabras de aliento y el camino recorrido juntas.

A todos mis AMIGOS, FAMILIARES, PROFESORES y PERSONAS que se hicieron presentes y contribuyeron a lo largo de este proceso.

A mis amados abuelos RAFAEL, ESPERANZA, MANUELA y JOSÉ GUADALUPE siempre
en mi alma y espíritu.

AGRADECIMIENTO

A mi *alma mater*, la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por permitirme en esta ocasión realizar mis estudios de Doctorado en Ciencias Ambientales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo financiero otorgado para realizar mis estudios de posgrado.

Al Dr. Rodrigo Rodríguez por ser mi director de tesis, por la constante motivación y la infinita paciencia.

Al Dr. Ramon Razo, al Dr. Pablo Octavio Aguilar, al Dr. Otilio Acevedo y al Dr. Miguel Ángel Rico, gracias por ser parte de mi formación profesional y personal.

Al Área Académica de Química del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería y la Dr. Claudia Romo, por el apoyo brindado.

Al Parque Nacional El Chico por las facilidades para realizar el presente trabajo.

A DIOS, A LA VIDA, A LA MADRE TIERRA Y EL UNIVERSO

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
ÍNDICE DE CUADROS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
RESUMEN GENERAL	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
3. JUSTIFICACIÓN	7
4. OBJETIVOS	8
4.1. Objetivo general	8
4.2. Objetivos específicos	8
5. HIPÓTESIS	9
6. ANTECEDENTES	10
CAPÍTULO I: ESTIMACIÓN DE HOJARASCA SECA QUE INGRESA ANUALMENTE EN BOSQUE DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltldl. et Cham.)	15
I.1. RESUMEN	16
I.2. ABSTRACT	17
I.3. INTRODUCCIÓN	18
I.4. METODOLOGÍA	20
I.4.1. Área de estudio	20
I.4.2. Muestreo	21
I.4.3. Colecta de hojarasca	22
I.4.4. Estimación de hojarasca en el bosque	24
I.4.5. Coeficiente de carbono	24
I.4.6. Análisis estadístico	24
I.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
I.6. CONCLUSIÓN	29

CAPÍTULO II: MODELO ALOMÉTRICO PARA ESTIMAR LA CANTIDAD DE BIOMASA EN LAS RAÍCES DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.)	30
II.1. RESUMEN	31
II.2. ABSTRACT	32
II.3. INTRODUCCIÓN.....	33
II.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	36
II.4.1. Área de estudio	36
II.4.2. Selección y extracción de árboles de <i>A. religiosa</i>	37
II.4.3. Variables evaluadas	39
II.4.4. Análisis de datos.....	40
II.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
II.6. CONCLUSIÓN	48
CAPÍTULO III: CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE BIOMASA TOTAL (AÉREA-RAÍZ) EN ÁRBOLES EN ETAPA DE BRINZAL DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.)	49
III.1. RESUMEN.....	50
III.2. ABSTRACT	51
III.3. INTRODUCCIÓN	52
III.4. METODOLOGÍA	54
III.4.1. Área de estudio.....	54
III.4.2. Colecta de muestras y determinación de biomasa.....	55
III.4.3. Densidad de árboles en etapa de brinzal.....	56
III.4.4. Análisis de datos.....	56
III.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	57
III.5.1. Biomasa por componente.....	59
III.5.2. Potencial de biomasa almacenada.....	60
III.6. CONCLUSIÓN	62
CAPÍTULO IV: CANTIDAD DE RAÍCES PRESENTES EN LOS PRIMEROS 30 CM DE PROFUNDIDAD DEL SUELO	63
IV.1. RESUMEN.....	64

IV.2. ABSTRACT.....	65
IV.3. INTRODUCCIÓN	66
IV.4. METODOLOGÍA	68
<i>IV.4.1. Área de estudio.....</i>	<i>68</i>
<i>IV.4.2. Muestreo</i>	<i>69</i>
<i>IV.4.3. Extracción de raíces.....</i>	<i>69</i>
<i>IV.4.4. Obtención de raíces.....</i>	<i>71</i>
<i>IV.4.5. Determinación de biomasa seca y carbono orgánico en raíces.....</i>	<i>73</i>
IV.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	75
IV.6. CONCLUSIÓN	80
7. CONCLUSIÓN GENERAL.....	81
8. REFERENCIAS	82

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO I: ESTIMACIÓN DE HOJARASCA SECA QUE INGRESA ANUALMENTE EN BOSQUE DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.)	15
Cuadro 1. Promedio de datos obtenidos en el muestreo de las 44 trampas.	27
Cuadro 2. Producción de hojarasca en un bosque de <i>A. religiosa</i> en un periodo de un año.....	27
Cuadro 3. Carbono en hojarasca de bosque de <i>A. religiosa</i> del Parque Nacional El Chico.	28
Cuadro 4. Carbono aportado por la producción de hojarasca en un bosque de <i>A. religiosa</i> en un periodo de un año.	28
CAPÍTULO II: MODELO ALOMÉTRICO PARA ESTIMAR LA CANTIDAD DE BIOMASA EN LAS RAÍCES DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.)	30
Cuadro 5. Intervalos de confianza de modelos aplicados a las variables de <i>A. religiosa</i> en etapa de brinzal.	44
Cuadro 6. Características morfológicas de los grupos formados.....	46
CAPÍTULO III: CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE BIOMASA TOTAL (AÉREA-RAÍZ) EN ÁRBOLES EN ETAPA DE BRINZAL DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.)	49
Cuadro 7. Análisis de agrupamiento de contenido de biomasa en plantas de <i>A. religiosa</i> en etapa de brinzal.	59
CAPÍTULO IV: CARBONO EN RAÍCES DE LOS PRIMEROS 30 CM DE PROFUNDIDAD DEL SUELO EN UN BOSQUE DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.)	63
Cuadro 8. Biomasa seca en raíces y Carbono presentes desde el piso hasta 30 cm de profundidad del suelo.....	75
Cuadro 9. Ordenamiento de los bloques, media y promedio.....	76
Cuadro 10. Carbono total en las 1,229.65 de bosque de <i>Abies religiosa</i> .;Error! Marcador no definido.78	

ÍNDICE DE FIGURAS

6. ANTECEDENTES	10
Figura 1. Flujo total anual de carbono en gigatón (miles de millones de toneladas), a través de las reservas más biológicamente activas (Stockmann <i>et al.</i> , 2013).	10
CAPÍTULO I: ESTIMACIÓN DE HOJARASCA SECA QUE INGRESA ANUALMENTE EN BOSQUE DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.)	1515
Figura 2. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.....	20
Figura 3. Puntos de muestreo y rodalización del Parque Nacional El Chico de acuerdo con su vegetación. Imagen tomada de Fragoso-López <i>et al.</i> (2017).	21
Figura 4. Trampas colectoras de hojarasca de 1 m ²	22
Figura 5. Toma de datos en campo de hojarasca acumulada.	23
CAPÍTULO II: MODELO ALOMÉTRICO PARA ESTIMAR LA CANTIDAD DE BIOMASA EN LAS RAÍCES DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.)	30
Figura 6. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.....	36
Figura 7. Los puntos representan las áreas de recolección, considerando un modelo aleatorio para representar la variación en toda la reserva. En algunas zonas se recolectó más de un individuo.....	37
Figura 8. Uso de rociador de mochila de agua a presión para extracción del sistema radicular.	38
Figura 9. Soporte de madera para sujetar el árbol y extraer el sistema radicular completo del mismo.	39
Figura 10. Gráfico de amalgamiento.....	45
CAPÍTULO III: CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE BIOMASA TOTAL (AÉREA-RAÍZ) EN ÁRBOLES EN ETAPA DE BRINZAL DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltdl. et Cham.).....	49
Figura 11. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico Hidalgo, México.	54
Figura 12. Agrupamiento por atributos morfológicos en plantas de <i>A. religiosa</i> en etapa de brinzal.....	58
Figura 13. Biomasa aérea y radicular en árboles de brinzal inicial (6 a 65 cm de altura).	60
Figura 14. Biomasa aérea y radicular en árboles de brinzal desarrollado (68 a 150 cm de altura).	60

Figura 15. Potencial de almacenamiento de biomasa aérea y radicular por hectárea de árboles de oyamel en etapa de brinzal en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo.	61
CAPÍTULO IV: CARBONO EN RAÍCES DE LOS PRIMEROS 30 CM DE PROFUNDIDAD DEL SUELO EN UN BOSQUE DE <i>Abies religiosa</i> (Kunth Schltl. et Cham.)	63
Figura 16. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.....	68
Figura 17. Rodalización del Parque Nacional El Chico de acuerdo con su vegetación. Imagen tomada de Fragoso-López <i>et al.</i> (2017).	69
Figura 18. Obtención de la muestra de raíces en bloques de 30×30×30 cm en el bosque de <i>A. religiosa</i>	70
Figura 19. Separación de las raíces gruesas y finas del suelo presentes desde el piso hasta 30 cm de profundidad.....	71
Figura 20. Muestra de raíces secas extraídas.	72
Figura 21. Trituración de las muestras de raíces.....	72
Figura 22. Muestras preparadas.	72
Figura 23. TOC-L modelo SSM-5000A marca SHIMADZU®.	73
Figura 24. Pesado y preparación de las muestras.....	73
Figura 25. Dimensión de los bloques excavados.	74

RESUMEN GENERAL

Dentro de un ecosistema forestal se reconocen diferentes componentes de almacén de carbono, biomasa sobre el suelo (árboles, arbustos y herbáceas), necromasa (árboles muertos en pie y en el piso forestal), biomasa bajo el suelo (raíces de toda la vegetación) y suelo (profundidad de 30 cm). El suelo es considerado como el segundo sumidero de carbono en la naturaleza y el mayor depósito terrestre. Sin embargo, la dificultad para obtener datos exactos de sus componentes, escasas metodologías y la falta de literatura dificultan cuantificar en su totalidad su capacidad de almacenamiento. El presente trabajo tiene como objetivo estimar la biomasa y carbono en raíces y hojarasca en suelos del bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico. Para esto se tomó como área de estudio la superficie de 1,229.65 hectáreas que corresponde al bosque de *A. religiosa*. Se determinó que se generan 4,070.1 toneladas de hojarasca sobre el suelo y una aportación de 2,160.4 Mg·ha⁻¹ de carbono al suelo en un periodo de un año. Se generó un modelo alométrico que permite obtener la biomasa y carbono de las raíces del oyamel a partir del peso fresco de la raíz $PFR = (20.918 + D (2.4475))$. Se obtuvo que en la etapa de brinzal se tiene una correlación en el potencial de acumular biomasa aérea/raíz en relación 3:1, sí mismo, que la biomasa en las raíces presentes en los primeros 30 cm de profundidad es de 7,855.31 toneladas y 3,439.84 Mg ha⁻¹ de carbono orgánico. El Área Natural Protegida Parque Nacional El Chico, se capturan y almacenan grandes cantidades de carbono, por lo que representa una de las áreas más importante para la mitigación del cambio climático, los resultados obtenidos complementan estudios previos de almacenamiento de carbono realizados en la misma área de estudio en estrato superior, arbustivo, herbáceas y en la necromasa, los cuales en conjunto reconocen su importancia y la necesidad de generar estrategias de conservación.

Palabras clave: Carbono, *Abies religiosa*, raíz, hojarasca, modelo alométrico.

ABSTRACT

Within a forest ecosystem, different carbon storage components are recognized: above-ground biomass (trees, shrubs, and herbaceous plants), necromass (dead trees standing and at the forest floor), below-ground biomass (roots of all vegetation), and soil (to a depth of 30 cm). Soil is considered the second largest carbon sink in nature and the largest terrestrial reservoir. However, the difficulty in obtaining accurate data on its components, limited methodologies, and a lack of literature make it difficult to fully quantify its storage capacity. This study aims to estimate the biomass and carbon in roots and litter in the soils of the *Abies religiosa* forest in El Chico National Park. For this purpose, the 1,229.65-hectare area corresponding to the *A. religiosa* forest was used as the study area. It was determined that 4,070.1 tons of leaf litter are generated on the ground and a contribution of 2,160.4 Mg ha⁻¹ of carbon to the soil in a period of one year. An allometric model was generated that allows obtaining the biomass and carbon of the fir roots from the fresh weight of the root $PFR = (20.918 + D (2.4475))$. It was obtained that in the seedling stage there is a correlation in the potential to accumulate aerial biomass / root in a 3: 1 ratio, itself, that the biomass in the roots present in the first 30 cm of depth is 7,855.31 tons and 3,439.84 Mg ha⁻¹ of organic carbon. The El Chico National Park Protected Natural Area captures and stores large amounts of carbon, making it one of the most important areas for climate change mitigation. The results obtained complement previous studies of carbon storage conducted in the same study area in the upper stratum, shrubs, herbs, and necromasa, which together recognize its importance and the need to generate conservation strategies.

Keywords: Carbon, *Abies religiosa*, root, litter, allometric model.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cambio climático global se encuentra asociado al incremento de temperatura superficial de la tierra, este es uno de los problemas ambientales más severos al que se enfrenta actualmente la humanidad. Propiciado por el incremento en la generación de gases de efecto invernadero, principalmente por dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), en particular las emisiones mundiales de CO₂ han aumentado casi un 50% desde 1990, siendo este el principal componente de estos contaminantes (FAO, 2019).

Los bosques son elementos reguladores ante el aumento de la concentración atmosférica de CO₂, ya que mediante la fotosíntesis su vegetación es capaz de convertirlo en biomasa (Herrero *et al.*, 2014). La biomasa son todos los componentes orgánicos dentro de un ecosistema (Litton *et al.*, 2007), esta es considerada como elemento importante de los bosques por el uso y funciones que se obtienen de ella, por ejemplo, almacenar carbono (C) y nitrógeno (N) y se considera esencial en el ciclo global de estos elementos (Peichl *et al.*, 2012, Schuler *et al.*, 2017). La capacidad que tiene un bosque de capturar carbono atmosférico tiende a disminuir en relación con el incremento de la edad del arbolado, se sabe que en edades tempranas o intermedias es mayor la tasa de captura de carbono (López-Reyes *et al.*, 2016). Lo anterior está relacionado con la velocidad de acumulación de biomasa que los bosques tienen, con el crecimiento neto de los árboles ya que son capaces de secuestrar más CO₂ del que emiten a través de la respiración, y la velocidad de captura de carbono (C) que es directamente proporcional a este crecimiento (Casiano-Domínguez *et al.*, 2018).

La manera de lograr una reducción de los gases de efecto invernadero es principalmente por dos procesos: a) la reducción de emisiones antropogénicas de CO₂, y b) conservar, crear y recuperar los sumideros de carbono en la biósfera. Este último punto refiere al manejo forestal

donde los bosques contribuyen a la mitigación del calentamiento global mediante el secuestro, almacenamiento y estabilización del carbono atmosférico (Vela, 2012; Orjuela, 2018).

Aproximadamente, en la biomasa de la vegetación de los bosques se encuentran almacenado 560 Gt (1 gigatón = 1 billón de toneladas) de carbono orgánico, en el suelo 2344 Gt y en los océanos 38400 Gt, estas cifras colocan al suelo como el segundo sumidero de carbono en la naturaleza y el mayor depósito terrestre (Stockmann *et al.*, 2013).

Las Áreas Naturales Protegidas (ANP) tienen como fin la conservación, protección y recuperación de los recursos naturales (Ocampo *et al.*, 2014; Dávalos *et al.*, 2014), ofrecen múltiples y valiosos servicios ecosistémicos a la sociedad, tales como, ayudar a la regulación de la temperatura y humedad a nivel regional, a la conservación del suelo, producción de agua, capturan y contienen grandes cantidades de carbono; por lo que son consideradas estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático (CONANP, 2015). Tal es el caso del Parque Nacional El Chico (PNCH), que es proveedor de importantes servicios ambientales para la región montañosa del centro de México y que alberga uno de los relictos más importantes de oyamel (*Abies religiosa* (Kunth) Schltld. et Cham) (CONANP, 2005).

Dentro de un ecosistema forestal se reconocen diferentes componentes de almacén de carbono: biomasa sobre el suelo (árboles, arbustos y herbáceas), necromasa (árboles muertos en pie y en el piso forestal), biomasa bajo el suelo (raíces de toda la vegetación) y suelo (profundidad de 30 cm) (Rodríguez, 2009).

El carbono ingresa al sistema del suelo en forma de detritus de plantas, incluyendo hojas muertas, raíces, ramas y madera (Trumbore, 2009), el suelo está constituido por una mezcla de minerales, aire, agua, fragmentos de rocas, biomasa microbiana y materia orgánica. El contenido de carbono orgánico del suelo depende de la profundidad a la que este es medido, siendo

principalmente en los primeros 20-30 cm su mayor actividad y a medida que incrementa la profundidad disminuye su contenido, aunque en la práctica solo se suelen medir cambios en los primeros 5 cm superficiales. Un factor muy importante que también influye en el contenido de carbono orgánico del suelo son las modificaciones en la cobertura terrestre (Kurniatun *et al.*, 2011).

La hojarasca es la fracción de la biosfera incorporada a la pedosfera (Blasco & Burbano, 2015) y que posteriormente se convierte en materia orgánica, esta es un elemento muy importante del suelo, que está compuesto por materiales en diferentes estados de descomposición, los materiales incluyen compuestos orgánicos en forma coloidal y de partículas, humus y carbón. (Zaiets & Poch, 2016).

La calidad de la materia orgánica del suelo está indicada por la relación de Carbono (C) y nitrógeno (N), debido a que mejora su estructura, la disponibilidad de nutrientes, la actividad microbiana y retención de agua. Esta determina el N disponible para las plantas, es decir, en valores altos la materia orgánica se descompone lentamente, ya que los microorganismos inmovilizan el nitrógeno y no puede ser utilizado por la vegetación, mientras que, en valores bajos entre 10 y 14, la actividad microbiana se estimula, por tanto, la mineralización y ruptura de tejidos es rápida y hay nutrientes suficientes para los microorganismos y para la vegetación. Aunado a esto, cuando la relación C/N de bacterias y hongos del suelo es menor a 15 los microorganismos son más eficientes en la descomposición de la materia orgánica (Gamarra Lezcano *et al.*, 2018, Cantú Silva & Luna Robles 2022)

Las raíces desempeñan un papel clave para los árboles: absorben agua y nutrientes del suelo, almacenan compuestos de carbono y proporcionan estabilización física en el suelo, debido a que constituyen entre el 20 - 40% de la biomasa forestal, además, las raíces finas de los árboles experimentan una renovación constante, que proporcionan aporte de biomasa al suelo (Brunner &

Godbald, 2007). Sin embargo, las raíces de los árboles son la parte de la vegetación menos estudiada y entendida de los ecosistemas (Smithwick *et al.*, 2014), y por tanto las estimaciones de su biomasa son escasas (Alongi, 2014). Su limitada información se debe a la dificultad para obtener los sistemas radiculares completos y por la gran cantidad de trabajo que implica la medición individual, que en ocasiones requiere máquinas pesadas en su extracción (Wang, 2006; Niiyama *et al.*, 2010; Alongi, 2014). Por consiguiente, hay que destacar que las metodologías propuestas hasta ahora manifiestan lo complicado que es evitar pérdidas de raíces y cierto porcentaje se rompen durante la excavación (Niiyama *et al.*, 2010).

La cantidad de carbono almacenado en las raíces generalmente se calcula a partir de ecuaciones alométricas o por mediciones directas (Adame *et al.*, 2017). El análisis dimensional o alometría es el estudio de cambio de proporción de varias partes de un organismo como resultado de su crecimiento, que en árboles requiere contar con funciones matemáticas que estimen la biomasa total con base en las dimensiones de los órganos de árboles (Avenidaño *et al.*, 2009). Para el caso de mediciones directas los modelos comúnmente utilizados rastrean el carbono solo en los 20 cm superiores, menos de la profundidad de enraizamiento en muchos suelos, y por lo tanto pueden perder parte del ciclo de carbono activo en los suelos (Chatterjee *et al.*, 2009).

La hojarasca, junto con biomasa de raíces de la vegetación y la materia orgánica contiene alrededor del 58% del carbono orgánico presente en el suelo (Stockmann *et al.*, 2013). Sin embargo, los estudios se han enfocado en estimar solo la acumulación de biomasa aérea en los bosques (Barrionuevo & Pan, 2009; Rau *et al.*, 2010; Fonseca *et al.*, 2011; Razo *et al.*, 2015; Saintilan *et al.*, 2013; Nakatsubo *et al.*, 2015; López *et al.*, 2016; Bolaños *et al.*, 2017; Oliveira *et al.*, 2018; Albers *et al.*, 2019; Van Pham *et al.*, 2019). Muy pocos se centran en la determinación

de la hojarasca y la raíz (Levillain *et al.*, 2011; Stockmann *et al.*, 2013; Herrero *et al.*, 2014; Smithwick *et al.*, 2014; Addo-Danso *et al.*, 2016; Sochacki *et al.*, 2016; Adame *et al.*, 2017).

Las investigaciones sobre la acumulación de carbono en los ecosistemas en la República Mexicana en su mayoría se han enfocado en el componente aéreo (Monreal *et al.*, 2005; Acosta-Mireles *et al.*, 2009; Avendaño *et al.*, 2009; Flores-Nieves *et al.*, 2011; Galeana-Pizaña *et al.*, 2013; Razo-Zárate *et al.*, 2013; Razo-Zárate *et al.*, 2015; López-Reyes *et al.*, 2016; Bolaños *et al.*, 2017), y solo algunas aportaciones para las raíces y suelo (Avilés *et al.*, 2009; Cruz-Flores & Etchevers-Barra, 2011; Pérez-Ramírez *et al.*, 2013). Por ello, en este trabajo se integran las mediciones directas en un modelo alométrico de cálculo de biomasa subterránea en un bosque de oyamel mexicano.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La vegetación de los bosques es el principal responsable del servicio ambiental de captura del CO₂, que mediante la fotosíntesis lo convierte en biomasa. Sin embargo, las actividades humanas generan más CO₂ de los que los bosques son capaces de convertir, esto se ve reflejado en la falta de áreas destinadas a la conservación y el deterioro de las que ya existen.

Se carece de datos cuantitativos del componente radicular y suelo que sumados al resto de los componentes (aéreo y necromasa) permitirá cuantificar en su totalidad la capacidad de almacenamiento de carbono en el bosque de *A. religiosa* del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México.

3. JUSTIFICACIÓN

El Parque Nacional El Chico es reconocido internacionalmente por su belleza escénica, este alberga uno de los relictos más importantes de *Abies religiosa* y es considerado el principal proveedor de servicios ambientales a la ciudad de Pachuca. De ahí surge la importancia de generar investigaciones que permitan evaluar a detalle su comportamiento y factores que lo pueden alterar o degradar.

La biomasa sobre el suelo y necromasa ha sido estudiada en El Parque Nacional El Chico. Sin embargo, no cuenta con información del carbono acumulado en el componente radicular y suelo, el determinar con precisión el carbono almacenado en todos sus componentes permitirá contribuir con información evidente para plantear estrategias de mitigación del calentamiento global.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Estimar la biomasa de raíces y hojarasca en suelos del bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico, para determinar la cantidad total de carbono almacenado.

4.2. Objetivos específicos

- 1) Estimación de hojarasca que ingresa anualmente en un bosque de *Abies religiosa*.
- 2) Generar un modelo alométrico para estimar la cantidad de biomasa en las raíces de *Abies religiosa*.
- 3) Determinar la capacidad de almacenamiento de biomasa total (aérea-raíz) en árboles en etapa de brinzal de *Abies religiosa*.
- 4) Estimar la cantidad de carbono en las raíces presentes en los primeros 30 cm de profundidad del suelo.

5. HIPÓTESIS

Se sabe que la masa radicular crece primero que la masa superficial en árboles como el *Abies religiosa*, además de que en el suelo se acumula otra gran cantidad de carbono que es sustraída a partir de las acículas defoliadas por los árboles. Si esta materia se acumula, es de esperarse que la cantidad de carbono almacenado en el suelo y raíces es superior a la contenida en la parte aérea del bosque de *A. religiosa*.

6. ANTECEDENTES

A nivel mundial, la cantidad de carbono almacenado en el suelo es la segunda reserva más importante, sólo presidido por el océano (38,400 Gt). Mientras que la reserva de carbono biótico terrestre es de 560 Gt de carbono orgánico (Figura 1), la acumulación de carbono en el suelo es más de cuatro veces esta cifra, sus dos fuentes de acumulación son: 1. La natural, proviene de la biosfera a través del volcanismo y la disolución de rocas; y 2. El antropogénico, proviene de la limpieza de la tierra (1–2 Gt al año) y las fuentes de combustibles fósiles (8.7 Gt C al año) (Stockmann *et al.*, 2013).

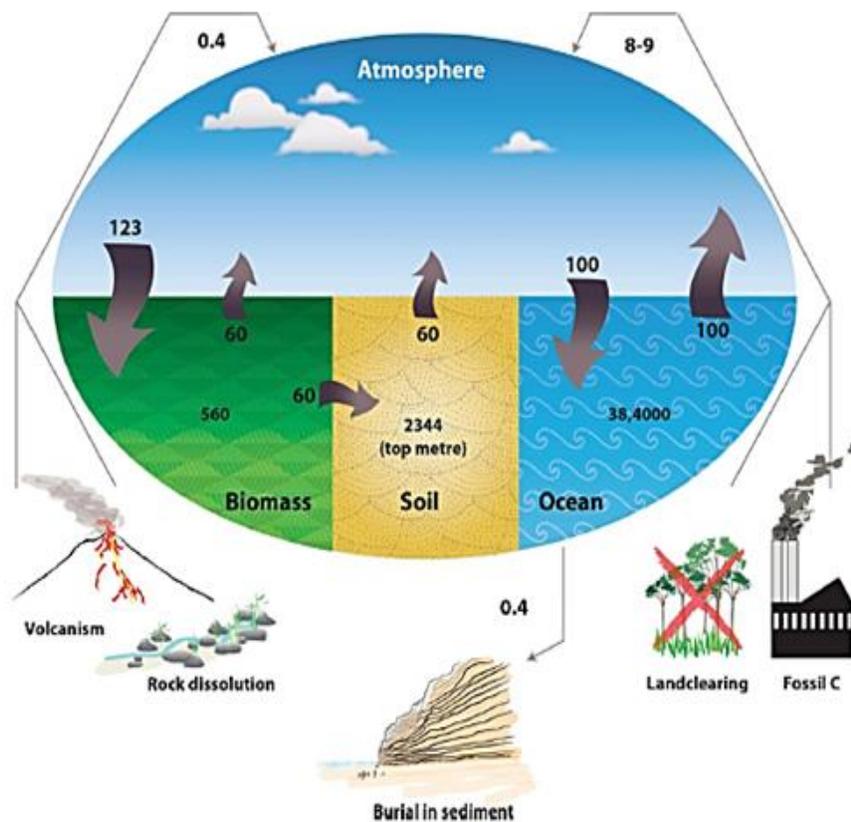


Figura 1. Flujo total anual de carbono en gigatón (miles de millones de toneladas), a través de las reservas más biológicamente activas (Stockmann *et al.*, 2013).

Con la Cumbre de Estocolmo en 1972, el tema ambiental empezó a ser prioridad a nivel mundial. En 1992 en la Cumbre de Río de Janeiro, se generaron cinco documentos, que tienen

como enfoque proteger el medio ambiente mientras se asegura el desarrollo económico y social de los cuales destacan: la declaración de principios sobre los bosques, en la cual hace mención de las función vital que cumplen estos ecosistemas como proveedores de servicios ambientales y recursos naturales para satisfacer las necesidades humanas y la Agenda 21 que propone el desarrollo de medidas para la evaluación de la contaminación, con el fin de reducir las emisiones, mediante una gestión sostenible de los sumideros y reservas de gases de efecto invernadero.

Fonseca y colaboradores (2011), estudiaron la acumulación de carbono en bosques secundarios y en plantaciones de *Vochysia guatemalensis* Donn e *Hieronyma alchorneoides* en Costa Rica, concluyen que la biomasa sobre el suelo contiene entre 11 y 17% del carbono total y que el suelo fue el principal depósito de carbono, ya que almacenó del 76 a 86% del carbono total.

Otro estudio de aplicación alométrica realizado en el norte de España en 2014 en bosques de *Eucalyptus globulus*, permitió estimar la biomasa total en el componente aéreo y en el componente subterráneo a partir del área basal y la altura del árbol, los resultados indicaron que la biomasa de la raíz representó el 15% y el 35% de la biomasa total (Herrero *et al.*, 2014).

En Australia probaron diversas metodologías de muestreo de biomasa de raíz en *Eucalyptus globulus*, con el fin de determinar la exactitud de cada método. Determinando que la excavación a granel fue el método más simple y potencialmente más eficiente en el tiempo para alcanzar una incertidumbre de muestreo del 10%. Sin embargo, la excavación hasta al límite de la raíz permite mejor precisión de la biomasa (Sochacki *et al.*, 2016).

En México, se han realizado diversas investigaciones sobre la captura de carbono en los diferentes componentes de los ecosistemas. En Texcoco, Estado de México, estimaron el carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés, el cual tuvo por objetivo estimar el carbono almacenado en cinco depósitos considerados en un ecosistemas forestales (biomasa viva sobre el

suelo, biomasa viva debajo del suelo, madera muerta sobre el suelo y carbono orgánico del suelo), obteniendo el promedio del contenido de carbono en el bosque de oyamel de los cinco componentes de 376 MgC ha⁻¹, el principal depósito fue el de biomasa aérea (59%), seguido del carbono orgánico del suelo (22%); en el bosque de ciprés fue de 205 MgC ha⁻¹, que fue el mayor depósito carbono orgánico del suelo (50%), seguido de biomasa aérea (36%) (Bolaños-González *et al.*, 2017).

Entre las aportaciones para áreas naturales protegidas destaca la estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera el Cielo, Tamaulipas. Se estimó un total de 110 MgC ha⁻¹ almacenada de la forma siguiente: en fustes, ramas y hojas el 75.3%, en raíces el 15%, en hojarasca el 9% y en los renuevos y la necromasa se encuentra el 0.4 y 0.3% respectivamente. Lo cual indicó que el bosque de pino-encino de la Reserva de la Biosfera El Cielo contribuye a mitigar el calentamiento global (Rodríguez *et al.*, 2009). Cruz-Flores & Etchevers-Barra (2011), realizaron una investigación en nueve áreas naturales protegidas de México con bosques templados, seleccionaron 187 sitios con rodales maduros de especies de los géneros *Pinus* y *Abies* y se logró determinar el contenido promedio de carbono orgánico del suelo (superior a 100 Mg C ha⁻¹), biomasa microbiana (osciló entre 0.25 y 2.6 MgC ha⁻¹) y carbono en necromasa (promedio de 45 MgC ha⁻¹).

En *Abies religiosa* se han realizado algunos estudios, tal es el caso del estado de Tlaxcala, donde se determinó la biomasa y el carbono en el componente aéreo. Se generaron dos ecuaciones alométricas utilizando 26 árboles con fuste recto y libre de daños, los resultados indican que la concentración de carbono en el fuste fue de 46.6%, en ramas de 4.6% y en follaje de 46.1% (Avendaño *et al.*, 2009) y en Texcoco, Estado de México generaron modelos para calcular la biomasa de fuste, de madera de ramas y de acículas de árboles completos y de ramas de oyamel en rodales del Cerro Tláloc, obteniendo que la biomasa total de los árboles se distribuye 97% en los

fustes, 3% en madera de ramas y 0.07% en follaje. Este patrón de distribución de biomasa refleja el efecto del deterioro de los bosques de *A. religiosa* (Flores *et al.*, 2011).

En el estado de Hidalgo han sido estimados los almacenes de carbono en el subsuelo de una toposecuencia (cresta, ladera, valle y planicie) de un bosque de *Fagus grandifolia* subsp. *mexicana*, generando el siguiente resultado: el mayor almacén de carbono se encontró en los primeros 15 cm de profundidad con 85 MgC ha⁻¹ en promedio (Avilés *et al.*, 2009).

Un estudio realizado en el estado de Michoacán se analizó el contenido de carbono orgánico del suelo, bajo diferentes condiciones forestales (arbolado conservado, aprovechado y perturbado), en dos tipos de vegetación (oyamel y pino-encino) dentro de la Reserva de la Biósfera Mariposa Monarca, los resultados muestran que el bosque de oyamel conservado tienen en promedio 153 MgC·ha⁻¹ de carbono orgánico del suelo, mientras que en el bosque aprovechado y perturbado tienen 95 y 125 MgC·ha⁻¹ respectivamente, en bosques conservados de pino-encino de 103 MgC·ha⁻¹, mientras que los aprovechados y perturbados tienen 39 y 13 MgC·ha⁻¹, respectivamente (Pérez-Ramírez *et al.*, 2013).

En el Parque Nacional El Chico se han realizado investigaciones, en las cuales han determinado el contenido de carbono en diferentes componentes, Razo-Zárate y colaboradores (2013), determinaron la biomasa y el carbono aéreo almacenado en los árboles muertos en pie, en árboles adultos vivos y en el renuevo establecido de forma natural en bosque de *A. religiosa*, tras 12 años de haber ocurrido un incendio forestal de tipo superficial que afectó 30.3 hectáreas. En sus resultados determinaron que no se consumieron por el fuego 665.0 MgC·ha⁻¹ y una captura actual de 297.3 MgC·ha⁻¹ por el renuevo establecido a 12 años del siniestro. Otro estudio determinó en el estrato arbustivo y herbáceo el coeficiente de carbono la superficie cubierta por bosque de *A. religiosa*. Los resultados mostraron que las especies del estrato arbustivo se distribuyeron en un

intervalo de coeficiente de carbono de 0.41 a 0.50 y en las herbáceas, el intervalo fue de 0.38 a 0.50 (Razo-Zárate *et al.*, 2015).

Fragoso-López y colaboradores (2017), realizaron un estudio que tenía como objetivo estimar la cantidad de contenido de carbono y su porcentaje de captura en el bosque de *A. religiosa*, el área de estudio fue en el Parque Nacional El Chico y lo dividió en rodales a través de análisis de imágenes de satélite. Los resultados indicaron en promedio que contiene 105.7 MgC ha⁻¹, con una tasa de secuestro estimada de 1.03 MgC ha⁻¹ año⁻¹. Concluyendo que, para lograr el máximo rendimiento en un bosque, es necesario que se implemente manejo forestal sostenible.

CAPÍTULO I:
ESTIMACIÓN DE HOJARASCA SECA QUE INGRESA ANUALMENTE EN BOSQUE
DE *Abies religiosa* (Kunth Schtdl. et Cham.)

I.1. RESUMEN

La hojarasca es la fracción de la biosfera incorporada a la pedosfera, está en conjunto con biomasa de raíces de la vegetación y la materia orgánica contiene alrededor del 58% del carbono orgánico del suelo. Es por esto que el presente estudio tiene como objetivo cuantificar la producción anual de hojarasca seca en bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico. Para esto se colocaron aleatoriamente 51 trampas colectoras de hojarasca en 1,229.65 ha, estas fueron elaboradas de malla plástica, cubriendo la superficie de 1 m² a una altura de 0.5 m del piso. Los muestreos se realizaron trimestralmente (4 muestreos en total) y consistían en tomar el peso fresco en campo de la hojarasca, posteriormente en laboratorio se introducían en una estufa de secado a 80 °C hasta alcanzar un peso constante para su posterior registro. Los resultados muestran que del periodo de julio de 2020 a abril de 2021 hay un aporte de hojarasca seca de 3.3 toneladas por hectárea, y de 4,069.5 toneladas en toda el área de estudio. A manera de conclusión el Parque Nacional El Chico es reconocido por su gran valor de conservación aportando servicios ecosistémicos como es el secuestro de carbono, generando 4,069.5 toneladas de hojarasca seca y aportando 2,034.7 Mg·ha⁻¹ de carbono al suelo en un año.

Palabras clave: hojarasca, carbono, *Abies religiosa*.

I.2. ABSTRACT

Leaf litter is the fraction of the biosphere incorporated into the pedosphere; it is composed of vegetation root biomass and organic matter and contains approximately 58% of the soil's organic carbon. Therefore, this study aims to quantify the annual production of dry leaf litter in the *Abies religiosa* forest in El Chico National Park. To this end, 51 litter traps were randomly placed across 1,229.65 ha. These were made of plastic mesh, covering an area of 1 m² at a height of 0.5 m from the ground. Sampling was carried out quarterly (4 samplings in total) and consisted of taking the fresh weight of the leaf litter in the field, then placing it in a drying oven at 80 °C in the laboratory until a constant weight was reached for later recording. The results show that from July 2020 to April 2021, the contribution of dry leaf litter amounted to 3.3 tons per hectare, and 4,069.5 tons across the entire study area. In conclusion, El Chico National Park is recognized for its great conservation value, providing ecosystem services such as carbon sequestration, generating 4,069.5 tons of dry leaf litter and contributing 2,034.7 Mg ha⁻¹ of carbon to the soil in one year.

Keywords: leaf litter, carbon, *A. religiosa*.

I.3. INTRODUCCIÓN

La hojarasca es la fracción de la biosfera que se incorpora a la pedosfera (Blasco & Burbano, 2015), es un material vegetal muerto que se desprende de una planta viva y representa aproximadamente el 70% del total del tejido foliar presente en el suelo forestal, el resto corresponde a tallos, ramitas y estructuras propagativas (Krishna y Mohan, 2017), durante la descomposición de esta se realizan procesos importantes para el mantenimiento de los ecosistemas (López *et al.*, 2015), siendo esta el aporte más importante de nutrientes y minerales disponibles al suelo (González-Rodríguez *et al.*, 2018).

La producción primaria neta de la hojarasca está determinada por la densidad de arbolado, apertura de dosel, incremento de biomasa y factores ambientales, como lo son la precipitación, temperatura, velocidad del viento, elevación, entre otros (López-Hernández *et al.*, 2013).

La hojarasca lleva a cabo funciones primordiales en los ecosistemas, como la generación de un microclima que funciona como capa protectora en la superficie del suelo, es fuente de alimento y soporte de múltiples comunidades microbianas, mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, ayuda en la infiltración del agua evitando la erosión (Hernández *et al.*, 2022), forma parte de los ciclo biogeoquímico y del ciclo del carbono (López-Hernández *et al.*, 2013), así mismo, a largo plazo permite comprender el funcionamiento de los ecosistemas forestales (Hernández *et al.*, 2022) y representa la principal vía por la cual se recargan los suelos de macronutrientes (Ca, Mg, K, N y P) y micronutrientes (Cu, Fe, Mn y Zn) (González-Rodríguez *et al.*, 2018).

La hojarasca da origen a la materia orgánica (Stockmann *et al.*, 2013) esta es otra de sus funciones fundamentales mediante un proceso de descomposición microbiana, el cual está influenciado por variables climáticas del sitio, la composición de especies, el contenido nutricional

en la hojarasca y las condiciones edáficas, entre otras (Moreno-Valdez *et al.*, 2018). La hojarasca, junto con biomasa de raíces de la vegetación y la materia orgánica contiene alrededor del 58% del carbono orgánico presente en el suelo (Stockmann *et al.*, 2013).

En los bosques se produce un gran aporte de hojarasca anualmente. Sin embargo, los estudios sobre este componente son reducidos en comparación con los estudios realizados en el componente aéreo (árboles y arbustos), por lo que se requieren de estudios enfocados en cada componente del ecosistema, que permitan evaluar cómo influye un componente sobre el otro y con ellos poder proponer estrategias mediante datos concisos y gestión de proyectos de conservación y recuperación de los suelos. Es por esto por lo que el presente estudio tiene como objetivo cuantificar la producción anual de hojarasca seca en bosque de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico.

I.4. METODOLOGÍA

I.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el Área Natural Protegida Parque Nacional El Chico, localizado en el extremo occidental de la Sierra de Pachuca, Hidalgo, en el Eje Neovolcánico Transversal (Figura 2). Se sitúa, geográficamente, entre las coordenadas extremas de los 20°10'10'' a 20°13'25'' latitud Norte y los 98°41'50'' a 98°46'02'' de longitud Oeste, cubre la extensión de 2,739 hectáreas, sus altitudes van de los 2600 a 3050 msnm (CONANP, 2005). Su clima es templado-subhúmedo con lluvias verano (C (m) (w) b (i0) gw) y temperatura media anual de entre 12 y 18 °C, los suelos predominantes son Cambisol húmico, Regosol dístico y Andosol húmico de textura media (CONANP, 2005). El 67% de la cobertura vegetal pertenece a bosque de *A. religiosa* (Fragoso-López *et al.*, 2017).

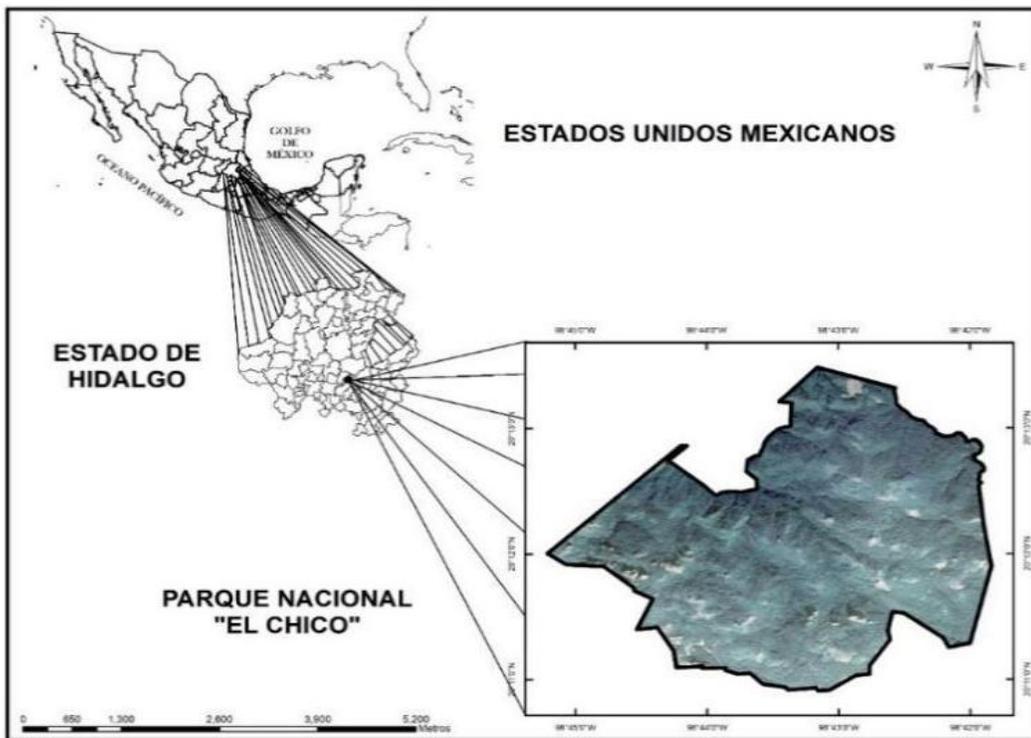


Figura 2. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

I.4.2. Muestreo

El área de estudio se centra en el 67 % de la vegetación presente en el PNCH que pertenece al bosque de *A. religiosa*, que corresponde a la superficie de 1,229.65 hectáreas (Fragoso-López *et al.*, 2017). La superficie de bosque de *A. religiosa* fue dividida en rodales. De acuerdo con la cobertura se determinó la probabilidad de ubicar un punto de muestreo conforme a la distribución normal. Se determinó el área mínima de error considerando el 5% de la distribución para el cálculo del tamaño de muestra (51 puntos). Mediante Sistemas de Información Geográfica se distribuyeron aleatoriamente los puntos en todos los rodales en que se divide el bosque de *A. religiosa* de manera que el número de sitios es proporcional al tamaño del rodal (Figura 3).

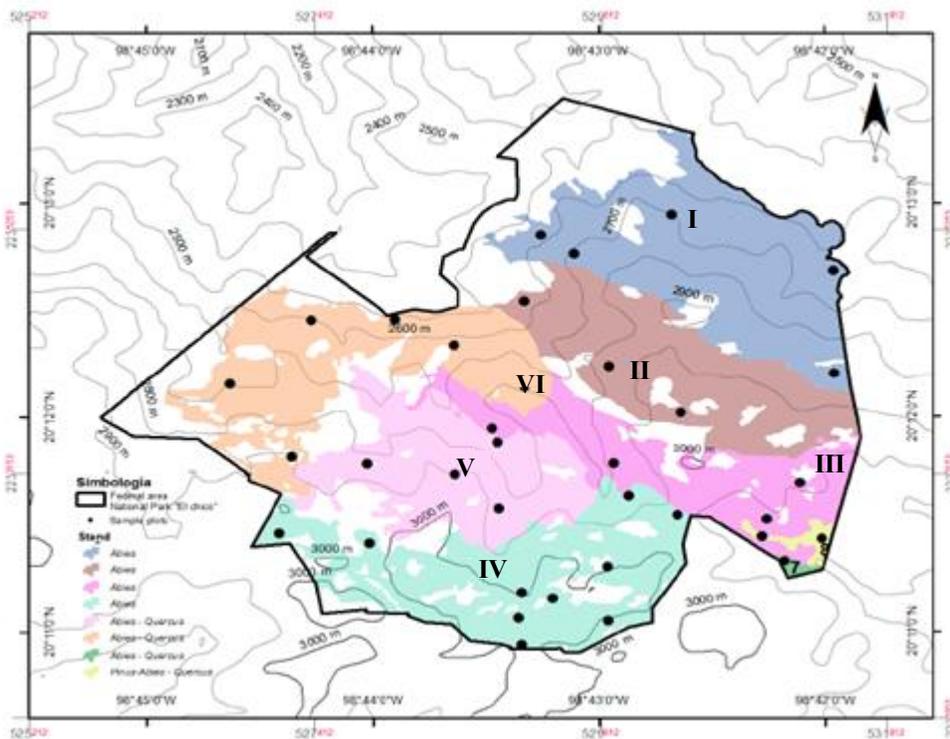


Figura 3. Puntos de muestreo y rodalización del Parque Nacional El Chico de acuerdo con su vegetación. Imagen modificada de Fragoso-López *et al.* (2017).

I.4.3. Colecta de hojarasca

Para estimar la cantidad de hojarasca que ingresa anualmente al suelo se colocaron trampas colectoras cuadradas que cubren la superficie de 1 m² (1 x 1 m) (Figura 4), tomando como criterio para su establecimiento un claro y que estuvieran rodeadas de *A. religiosa*, estas fueron elaboradas de malla plástica que permite drenar el agua de lluvia y a su vez es capaz de retener material vegetal de 1 mm de grueso, la malla se colocó sobre estacas de madera (8 en total) a la altura de 0.5 m del piso forestal, para evitar que factores externos como corrientes de agua o fauna silvestre alteren la acumulación de la hojarasca. Al término de establecer el total de las trampas en campo se retiró la hojarasca que se acumuló en cada una de ellas y así tomar como fecha de inicio de conteo de todas las trampas a partir del 15 de julio del 2020.



Figura 4. Trampas colectoras de hojarasca de 1 m².

Durante un año se realizaron muestreos trimestralmente teniendo el total de 4 por sitio de muestreo. Las fechas de colecta de hojarasca fueron: 15 de octubre del 2020, 15 de enero, 15 de abril y el 15 de julio del 2021. La hojarasca retenida en las trampas se les tomó el peso fresco en campo con báscula marca BIOBASE® modelo BE16001 (Figura 5) y se colocaron en bolsas de papel previamente identificadas. Las cuales se llevaron al laboratorio de Semillas y Germoplasmas del Instituto de Ciencias Agropecuarias-UAEH, para ser colocadas en la estufa GRIEVE® modelo LW-201C de secado a temperatura constante de 80 °C hasta alcanzar un peso constante para su posterior registro.



Figura 5. Toma de datos en campo de hojarasca acumulada.

1.4.4. Estimación de hojarasca en el bosque

Para obtener la producción anual de hojarasca se procedió a multiplicar el peso promedio acumulado de hojarasca capturada en las trampas (1 m²) por una hectárea (10,000 m²) y el resultado por las 1,229.65 ha que el parque posee de bosque de *A. religiosa*.

$$PTH = \frac{AAH * 10,000 * 1,229.65}{1000}$$

PTH=Producción total de hojarasca en toneladas

AAH=Acumulación anual de hojarasca en kilogramos

1.4.5. Coeficiente de carbono

El coeficiente de carbono de la hojarasca que ingresa al suelo se determinó mediante el procedimiento siguiente: Se unificó una muestra compuesta por cada periodo de colecta (4 en total), para esto se mezcló toda la hojarasca y se obtuvo una fracción que contenía elementos de acículas de *A. religiosa*, hojas de arbusto y árboles, musgo, semillas y ramillas, se introdujeron a la estufa de secado por 24 horas a 80 °C para perder la humedad que pudieron adquirir durante su almacenamiento. Posteriormente se procesaron en el molino tipo mortero marca RETSCH® modelo RM200 hasta que las partículas quedaron de textura fina, se homogeneizó a través del tamiz de materia orgánica del No. 35 y se almacenaron en bolsas herméticas. En el Área Académica de Química del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería-UAEH se les determinó la concentración de carbono orgánico utilizando el equipo TOC-L modelo SSM-5000A marca SHIMADZU®, en el módulo de muestras sólidas.

1.4.6. Análisis estadístico

Los datos de producción anual de hojarasca en los sitios de estudio se sometieron al análisis de varianza basado en un diseño completamente al azar (Steel y Torrie 1980), posteriormente se

aplicó la prueba de comparación de medias Tukey ($p < 0.05$) con el software Statistical Package for the Social Sciences (SPSS) versión 24 (SPSS, 2016).

I.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado que las trampas se colocaron lejos de los senderos dentro de los rodales del bosque de *A. religiosa* de las 51 trampas establecidas se mantuvieron 44 trampas de las cuales se obtuvieron datos en las cuatro mediciones realizadas, el resto no fue posible recuperarlas. Los resultados de aporte promedio de hojarasca al piso forestal fueron de 201.4 g, en el periodo del 15 de julio al 15 de octubre y del 16 octubre al 15 de enero de 102.32 g, por metro cuadrado. Lo anterior muestra que hay períodos de hasta del doble de aportación de hojarasca en el piso forestal en bosques de *A. religiosa* (Cuadro 1). También se identificaron periodos en que la hojarasca mantiene mayor cantidad de humedad, condición que se requiere para el proceso de degradación de esta. Mediante la separación de la hojarasca que se colectó en algunas trampas se determinó que aproximadamente el 90% del material vegetal pertenece a acículas de *A. religiosa* y el resto a hojosas del sotobosque, ramillas y semillas de diversas fuentes. Lo anterior indica que la biomasa de hojarasca aportada por la parte aérea del bosque se acerca mucho al 60% de biomasa seca, datos similares reporta Lusk y colaboradores (2001). De acuerdo con los datos de la hojarasca seca se observa que en el periodo de enero a abril es cuando se tiene mayor aporte, esto debido a que posterior de las heladas de invierno se secan acículas y caen en los vientos de febrero.

Cuadro 1. Promedio de datos obtenidos en el muestreo de las 44 trampas.

Periodo	Peso fresco (g)	Peso seco (g)
Julio-Octubre	201.3	86.2
Octubre-Enero	102.3	82.4
Enero-Abril	189.4	119.0
Abril-Julio	110.5	43.3
Suma	603.6	330.9

Cabe resaltar que en el periodo de un año (julio de 2020 a junio de 2021) hay el aporte de hojarasca en promedio de 3.31 toneladas por hectárea, se reconoce la importancia de conservación del bosque de *A. religiosa* en el Parque Nacional El Chico acumula en el piso aproximadamente 4,069.5 toneladas en las 1,229.65 hectáreas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Producción de hojarasca seca en un bosque de *A. religiosa* en un periodo de un año.

Producción de hojarasca seca por hectárea (ton)	Producción de hojarasca en las 1,229.65 hectárea (ton)
3.31	4,070.1

El análisis de correlación de Pearson indica que es significativa entre el peso fresco y el peso seco de la hojarasca en el periodo de julio a octubre ($r=0.94$, $p=4.965 \text{ E}^{-15}$), de octubre-enero ($r=0.9864$, $p=2.3547 \text{ E}^{-22}$), de enero a abril ($r=0.88466$, $p=1.6589 \text{ E}^{-22}$) y de abril a julio ($r=0.9864$, $p=2.3547 \text{ E}^{-22}$).

Se obtuvo el coeficiente de carbono para la hojarasca por cada periodo de muestreo (Cuadro 3) y se promedió para obtener uno general (Cuadro 4) y se aplicó.

Cuadro 3. Carbono en hojarasca de bosque de *A. religiosa* del Parque Nacional El Chico.

Muestra del Periodo	Carbono %
Julio-Octubre	52.72
Octubre-Enero	52.74
Enero-Abril	53.90
Abril-Julio	52.99
Coefficiente de carbono	53.08

Cuadro 4. Carbono aportado por la producción de hojarasca seca en un bosque de *A. religiosa* en un periodo de un año.

Producción de carbono por hectárea (ton)	Aporte de carbono en las 1,229.65 hectárea (ton)
1.75	2,160.4

En la vegetación del matorral espinoso tamaulipeco del norte del noreste de México se produce 5.6 kg/ha^{-1} de hojarasca compuesta por hojas, ramas, estructuras reproductivas y componentes diversos (López-Hernández *et al.*, 2013), mientras que en el bosque *A. religiosa* 3.31 toneladas en las 1,229.65 hectáreas.

I.6. CONCLUSIÓN

El bosque de *A. religiosa* del Parque Nacional El Chico es reconocido por su gran valor de conservación y de aporte de servicios ecosistémicos, como es la producción de biomasa y el secuestro de carbono, generando 4,070.1 toneladas de hojarasca seca en un año y una aportación de 2,160.4 Mg·ha⁻¹ de carbono al suelo.

El proceso de colecta de hojarasca en las trampas se vio influenciado por diferentes factores naturales, tales como, densidad de la vegetación, época del año, caída de árboles, diversidad de especies presentes, entre otros, este último factor a simple vista nos muestra que un equilibrio entre especies perennes y caducifolias produce una mayor cubierta vegetal de hojarasca y retención de suelo, datos que se podrían comprobar en próximos estudios.

CAPÍTULO II:

MODELO ALOMÉTRICO PARA ESTIMAR LA CANTIDAD DE BIOMASA EN LAS

RAÍCES DE *Abies religiosa* (Kunth Schtdl. et Cham.)

II.1. RESUMEN

El uso de herramientas de la alometría permite estimar la biomasa de una especie vegetal con mayor precisión. Las raíces de los árboles son la parte de la vegetación menos estudiada debido a la dificultad para obtener los sistemas radiculares completos. El objetivo del presente estudio fue generar un modelo alométrico para estimar la cantidad de biomasa acumulada en el sistema radicular de árboles de *Abies religiosa* en etapa de brinzal en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo. Para esto se extrajeron 61 árboles de *Abies religiosa* desde 0.06 hasta 3.56 m de altura, utilizando mochila aspersora de agua a presión que desprendió el suelo de la raíz. La variable de respuesta fue el peso fresco de la raíz y las variables independientes fueron altura, diámetro y edad+1, de acuerdo con el ajuste de los modelos probados. Altura*Diámetro (HD) fue el modelo con mejor ajuste ($r^2 = 0.96 \pm 0.03$), resultando en la siguiente ecuación $RDW = (-2E-0.5(HD)^2) + (0.2742(HD)) - 0.1299$). El modelo alométrico estima con precisión la biomasa subterránea contenida en las raíces, lo que permite medir la biomasa completa de un bosque de *A. religiosa* al incluir datos tanto de los componentes aéreos como de las raíces.

Palabras clave: alometría, raíz, carbono, Parque Nacional El Chico.

II.2. ABSTRACT

The use of allometric tools improves estimation of the biomass of a plant species. Tree roots are the least studied part of vegetation due to the difficulty in examining complete root systems. The objective of the present study was to generate an allometric model to estimate the amount of accumulated biomass in the root system of *Abies religiosa* trees in El Chico National Park, Hidalgo. 61 trees of *Abies religiosa* from 0.06 to 3.56 m in height were extracted using a backpack pressurized water sprayer that detached the soil from the root. The response variable was root dry weight (RDW) and the independent variables were height, diameter, age+1 and all interactions, according to the fit of the models tested. Height*Diameter (HD) was the model with the best fit ($r^2 = 0.96 \pm 0.03$), resulting in the following equation $RDW = (-2E-0.5(HD)^2) + (0.2742(HD)) - 0.1299$). The allometric model accurately estimates the below-ground biomass contained in the roots, which will allow us to measure the complete biomass of an *A. religiosa* forest by including data on both the aerial and root components.

Key words: allometry, root, carbon, El Chico National Park.

II.3. INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas, el cambio en el uso del suelo, especialmente la deforestación y la degradación forestal, ha representado entre el 12% y el 20% de las emisiones antropogénicas mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) (Friedlingstein *et al.*, 2022). La evaluación precisa de las reservas forestales de carbono es crucial para el éxito de la aplicación de las políticas de mitigación del cambio climático (Chave *et al.*, 2014). Actualmente cuantificar la reserva de carbono en los bosques de manera precisa sigue siendo un desafío a nivel mundial (Yepes *et al.*, 2016).

La superficie forestal de México es de aproximadamente 65 millones de hectáreas, lo que representa una tercera parte del territorio nacional, 51% corresponde a bosques templados y 49% a bosques tropicales (Torres-Rojo *et al.*, 2016). Los bosques de *Abies religiosa* Kunth Schltld. et Cham., son importantes sumideros de carbono atmosférico, es una conífera endémica de México (Argüelles-Moyao *et al.*, 2017) que se distribuye principalmente de entre 2400 y 3600 m de altitud a lo largo del Cinturón Volcánico Transmexicano. La principal función ecológica del bosque de *A. religiosa* es como hospedador preferido de las poblaciones de mariposa monarca que llegan a hibernar en México (Sáenz-Romero *et al.*, 2012), además de proveedor de servicios ambientales y fungir como reservorio de biodiversidad de organismos como saprótrofos y micorrizas (Argüelles-Moyao *et al.*, 2017). Económicamente destaca el uso de la madera como materia prima para producción de celulosa y papel y el ecoturismo por su imponente belleza escénica (Rzedowski, 2006).

Los estudios sobre los procesos de los ecosistemas subterráneos son relativamente escasos en comparación con los que se ocupan de los rasgos de las plantas por encima del suelo, ya que las raíces y la rizósfera están ocultas en el suelo (Smit *et al.*, 2000). Los estudios sobre las raíces suelen

basarse en metodologías que requieren tiempo y, por tanto, son costosas (Maeght *et al.*, 2013). Su limitada información se debe a la dificultad para obtener los sistemas radiculares completos y por la gran cantidad de trabajo que implica la medición individual, que en ocasiones requiere máquinas pesadas en su extracción (Wang, 2006; Niiyama *et al.*, 2010; Alongi, 2014), otro tanto puede decirse del reducido marco conceptual y terminología existente (Smithwick *et al.*, 2014). Por consiguiente, hay que destacar que las metodologías propuestas hasta ahora manifiestan lo complicado que es evitar pérdidas de raíces y cierto porcentaje se rompen durante la excavación (Niiyama *et al.*, 2010). Las estimaciones de biomasa de raíces en árboles son escasas, lo que conlleva a desconocer datos concisos de la reserva global de carbono que se encuentra en determinado ambiente (Alongi, 2014).

En los ecosistemas dominados por árboles, la biomasa aérea de la vegetación suele deducirse a partir de los datos del censo del suelo. Las mediciones biométricas de los árboles se convierten en valores de biomasa mediante un modelo alométrico empírico (Brown, 1997). Un modelo alométrico es una herramienta que permite relacionar una o más variables fáciles de medir (por ejemplo, diámetro a la altura del pecho, altura, edad) para estimar una variable difícil de medir (por ejemplo, volumen, biomasa, carbono) (Basuki *et al.*, 2009).

El uso de las herramientas de la alometría permite estimar la biomasa de una especie en particular con mayor exactitud (Smithwick *et al.*, 2014; Basuki *et al.*, 2009), se obtienen a partir de la extracción de árboles y la medición de un conjunto de datos para su calibración (Návar, 2009; Ishihara *et al.*, 2015). El tamaño de muestra para las ecuaciones alométricas de la biomasa de la raíz es pequeño en comparación con los de la biomasa aérea, debido a las dificultades de excavación de sistemas de raíces enteros. (Ishihara *et al.*, 2015) pero que es necesario en todos los ecosistemas

para generar una ecuación alométrica por especie, que permitan estimar con exactitud la biomasa con solo tomar algunos datos de manera más accesible y evitar muestreo destructivo (Návar, 2009).

Diversas publicaciones actuales están orientadas a estimar el carbono almacenado en los diferentes componentes aéreos (árboles, sotobosque y necromasa) en los distintos tipos de vegetación (Álvarez *et al.*, 2012, Ekoungoulou *et al.*, 2014, Yepes *et al.*, 2016), desafortunadamente el componente radicular de almacenamiento de carbono carece de estimaciones, Rojas-García y colaboradores en 2015 realizaron una base de datos de ecuaciones alométricas realizadas en bosques de México, la cual dio como resultado que de las 478 ecuaciones encontradas en la literatura solo 5 pertenecían a raíces de árboles, esto limita conocer la cantidad total de carbono almacenado en los diferentes ecosistemas y la generación de estrategias de mitigación de cambio climático. En el presente estudio se planteó desarrollar una ecuación alométrica que permita estimar la biomasa subterránea de la especie de *A. religiosa* en etapa de brinjal.

II.4. MATERIALES Y MÉTODOS

II.4.1. Área de estudio

El trabajo se realizó en el Parque Nacional El Chico, ubicado en el extremo occidental de la Sierra de Pachuca, en el Eje Neovolcánico Transverso. Está situado entre las coordenadas extremas de 20°10'10" a 20°13'25" de latitud norte y 98°41'50" a 98°46'02" de longitud oeste y cubre el área de 2739 ha (Figura 6). Sus altitudes oscilan entre 2600 y 3050 msnm, tiene un clima templado-subhúmedo con lluvias en verano, una temperatura promedio anual entre 12 y 18 °C, y los suelos predominantes son Cambisol húmico, Regosol districo y Andosol húmico de textura media. (CONANP, 2005).

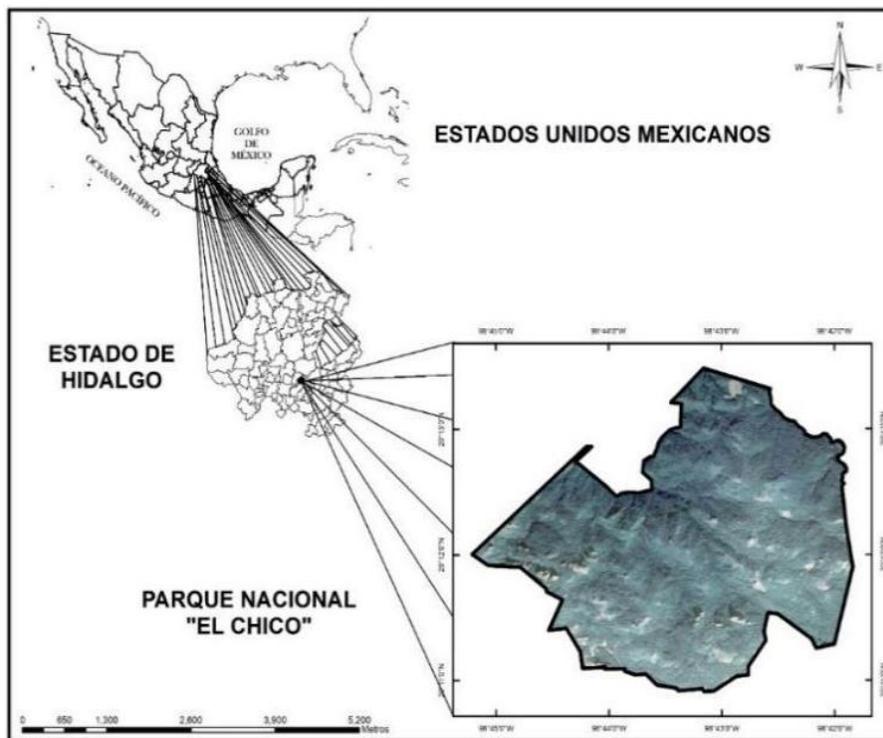


Figura 6. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

El 67% de la cobertura vegetal corresponde al bosque de *A. religiosa*, distribuida en 6 rodales los cuales se muestran en la figura 7 (Fragoso-López *et al.*, 2017), los puntos representan

las áreas de recolección, considerando un modelo aleatorio para representar la variación en toda la reserva. En algunas se recolectó más de un individuo.

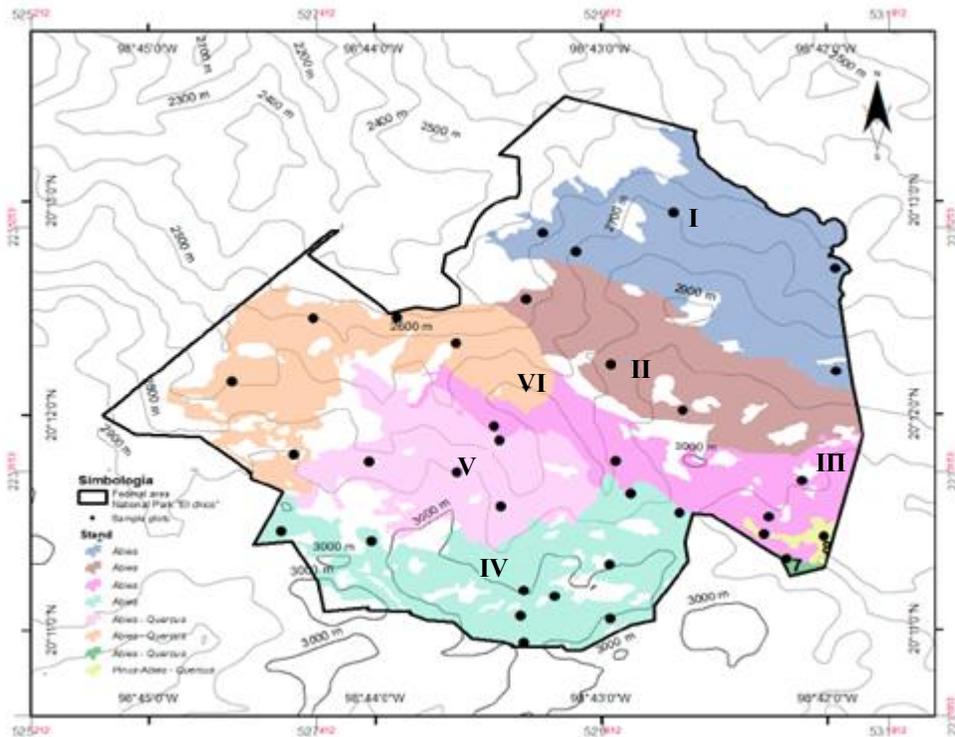


Figura 7. Los puntos representan las áreas de recolección.

II.4.2. Selección y extracción de árboles de *A. religiosa*

Se calculó el tamaño de muestra, considerando un primer muestreo de 14 individuos asumiendo el error de 9% de acuerdo con la muestra inicial, obteniendo que se debían muestrear 54 individuos. Para seleccionar los individuos a extraer y pesar la biomasa radicular se realizaron recorridos dentro del PNCH identificando espacios (claros) en el bosque lo suficientemente amplios que permitió la regeneración natural de *A. religiosa*, después se seleccionaron los árboles tomando en cuenta los criterios siguientes: alturas continuas a partir de los 6 y hasta 356 cm, libres de daños mecánicos, vivos y alejados de caminos o brechas con suelo compactado.

Los árboles seleccionados se prepararon un día antes previo a su extracción, lo que consistió en retirar el musgo y materia orgánica con rastrillo y se agregó suficiente agua (un promedio de 80 litros) alrededor de la base del individuo con el fin de humedecer y ablandar la tierra del área que abarca el sistema radicular, al día siguiente con el uso de un rociador de mochila de agua a presión se procedió cuidadosamente a desprender el suelo de la raíz (Figura 8), para asegurar la extracción completa del sistema radicular de cada árbol se ubicó cada ramificación y siguió su curso con el rociador hasta el final de cada raíz, lo que evitó al máximo la pérdida de las raíces finas, con el fin de facilitar los trabajos y evitar dañar el árbol se ató con una cuerda en la parte media del fuste a un soporte de madera en forma de escuadra fijado al suelo logrando que quedara suspendido y en posición vertical (Figura 9) durante todo el proceso de extracción hasta lograr que el sistema radicular estuviera completamente libre.



Figura 8. Uso de rociador de mochila de agua a presión para extracción del sistema radicular.



Figura 9. Soporte de madera para sujetar el árbol y extraer el sistema radicular completo del mismo.

II.4.3. Variables evaluadas

Se extrajeron en total 61 árboles de *A. religiosa*, siete más del tamaño de muestra obtenido (54 muestras) con el fin de incrementar la exactitud del modelo alométrico. Una vez obtenido el ejemplar se lavó cuidadosamente la raíz y se dejó secar al aire por aproximadamente 2 horas (Fonseca *et al.*, 2009). Las variables evaluadas en campo fueron las siguientes: diámetro a la base, altura total, edad, peso fresco y seco del árbol completo, peso fresco y seco de raíz, número de ramificaciones de raíz y diámetro de la raíz principal. Los diámetros se midieron con vernier digital marca Mitutoyo® modelo CD-6"CS con precisión a milímetro, la altura se midió con cinta métrica Marca Truper® de 5 metros graduada en mm, la edad se estimó realizando el conteo del número de verticilos por individuo dado que estos se producen a una tasa de un verticilo por año en *A.*

religiosa (Lara-González *et al.*, 2009), los pesos frescos del árbol completo y del componente raíz se obtuvieron en campo con la báscula marca BIOBASE® modelo BE16001.

Posteriormente se colocaron en bolsas de papel previamente etiquetadas la parte aérea y la raíz de cada árbol por separado y se llevaron al laboratorio de Semillas y Germoplasma del Instituto de Ciencias Agropecuarias-UAEH para su secado en la estufa de marca GRIEVE® modelo LW-201C a temperatura de 80 °C hasta alcanzar peso constante, se registró el peso seco del árbol completo y de solo la raíz.

II.4.4. Análisis de datos

Para determinar el modelo alométrico se utilizó la regresión múltiple considerando una distribución potencial ($a + (xb)$) de los datos, ya que fue el mejor ajuste ($r^2 = 0.93 \pm 0.04$). La variable de respuesta fue el peso fresco de la raíz (PFR), lo que se utilizó para calcular la biomasa; las variables independientes fueron altura total, diámetro a la base y edad+1, de acuerdo con el ajuste al modelo potencial. El modelo mínimo predictivo se generó mediante Cadenas de Markov (5000 steps por bootstrap) y el intervalo de confianza se estableció por 50 iteraciones. El índice de Akaike (AIC) fue el indicador de confiabilidad para determinar el mejor modelo. El modelo fue probado con 1000 puntos aleatorios para determinar la correlación lineal resultante entre los valores del peso fresco observado y esperado (Van Ravenzwaaij *et al.*, 2018).

La hipótesis de normalidad en la distribución de los residuos se verificó con la prueba Chi cuadrada de Pearson, para comprobar la hipótesis de homogeneidad de las varianzas, mediante la prueba Lavene (Zar, 2010). Asimismo, para garantizar que los grupos son morfológicamente distintos se procedió a realizar un análisis de Cluster considerando la altura total, el diámetro a la base, la edad, la cantidad de ramificaciones de las raíces, el peso fresco y seco del árbol y el peso fresco y seco de la raíz, mediante el método de Ward basado en distancias Euclidianas. Estos grupos

fueron contrastados mediante un Análisis de Funciones Discriminantes, previa comprobación de la multinormalidad mediante la prueba de Mardia (Härdle & Simar, 2015).

II.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos en campo de los 61 árboles de *A. religiosa* extraídos con el sistema radicular se sometieron al análisis de regresión múltiple para obtener las variables que mejor ajustaban y generar el modelo alométrico, las variables fueron: diámetro a la base (DB), donde los datos obtenidos iban de 0.08 hasta 6.28 cm y altura total (TH) que fluctuó de los 0.06 hasta 3.56 m, la variable altura fue el principal índice a la hora de seleccionar los árboles a extraer ya que a partir del primer árbol se buscaron ejemplares que fueran aumentado su altura, evitando muestrear individuos de la misma altura. En lo que refiere a la biomasa de la raíz de *A. religiosa* varió de acuerdo con los factores siguientes: los árboles de talla pequeña de altura total presentaron mayor biomasa radicular que árboles de talla mediana, esto se relaciona a que sus condiciones ecológicas de desarrollo difieren, tales como la humedad del suelo, la disponibilidad de espacio, competencia por radiación solar, entre otros, los resultados obtenidos están en el rango de 0.03 hasta 0.525 kg de biomasa radicular por árbol.

La ecuación generada en este estudio para la estimación de la biomasa radicular en árboles de *A. religiosa* se puede utilizar en otros bosques de la misma especie que cumplan con ciertas condiciones, tales como misma unidad de suelo, clima con rangos similares de temperatura, precipitación y altura sobre el nivel del mar, principalmente. Este modelo permite ser utilizado en todas sus etapas de desarrollo de los árboles de *A. religiosa* sin que el rango de error aumente.

Si se pretende estimar la cantidad de biomasa radicular que está presente en un bosque de oyamel, que cumpla con las condiciones ecológicas permitirá aplicar el modelo alométrico con solo medir las variables de altura total y diámetro a la base del árbol, lo que permite optimizar gastos, tiempo y mano de obra en comparación con la extracción total del individuo. Rojas-García y colaboradores en 2015 mencionan que, para estimar la biomasa aérea, las variables principales

consideradas para generar un modelo alométrico son la altura total y diámetro normal del árbol, lo que resulta en que tanto para estimar la biomasa aérea y radicular se utilizan principalmente las mismas variables independientes, lo que permite estimar mejor la posible variación por las condiciones ecológicas.

El modelo mínimo con mejor ajuste y que resulta tener significativamente menor error fue el basado en el diámetro, por lo que se selecciona este modelo. La ecuación propuesta para *A. religiosa* es:

$$\text{PFR} = (20.918 + D (2.4475))$$

Donde:

PFR=Peso fresco de la raíz (g)

D=Diámetro (cm)

La comprobación del modelo generó una regresión significativa con ajuste del 80.9% de los casos ($F(1,998) = 5058$; $p < 0.0001$; $r^2 = 0.8352$). Los intervalos de confianza indican que los modelos basados en altura+edad, diámetro+edad, altura+diámetro y el modelo completo no difieren entre sí (Cuadro 5), mientras que los modelos con variables únicas altura, diámetro y edad difieren.

Cuadro 5. Intervalos de confianza de modelos aplicados a las variables de *A. religiosa* en etapa de brinzal.

Índice de Akaike							
	MA	MD	ME	MAD	MAE	MDE	MADE
Promedio	0.530	0.499	0.513	0.595	0.593	0.563	0.595
Desviación estándar	0.007	0.007	0.006	0.007	0.007	0.007	0.007
Mínimo	0.522	0.492	0.507	0.588	0.587	0.556	0.588
Máximo	0.537	0.506	0.520	0.602	0.600	0.570	0.602
Diferencias Sign.	b	c	b	a	a	a	a

MA=Modelo altura	MAE= Modelo altura edad
MD=Modelo diámetro	MDE=Modelo diámetro edad
ME=Modelo edad	MADE=Modelo altura diámetro edad
MAD=Modelo altura diámetro	

De todas las variables evaluadas el número de ramificaciones de raíz y diámetro de la raíz principal no se utilizaron en la elaboración del modelo alométrico. De acuerdo con los atributos evaluados el modelo fue capaz de retener una tasa de extrapolación de la biomasa contenida en los árboles de *A. religiosa*.

El análisis de agrupamiento mostró cuatro grupos relacionados con todas las variables y un árbol aislado (Figura 10). Con estos grupos se realizó un análisis de clasificación discriminante para determinar las variables más importantes en el modelo señalados por * en la Cuadro 6. En todos los casos las distancias de Mahalanobis obtenidas fueron diferentes significativamente, asociados con un solo factor discriminante que explica más del 99.003% de la varianza entre grupos y con un eigenvalor mayor a 16. Los análisis de asignación posterior permiten asignar al 100% de

los individuos con su categoría correspondiente, por lo que en futuros trabajos será posible distinguir la biomasa de acuerdo con la altura y el diámetro de los individuos.

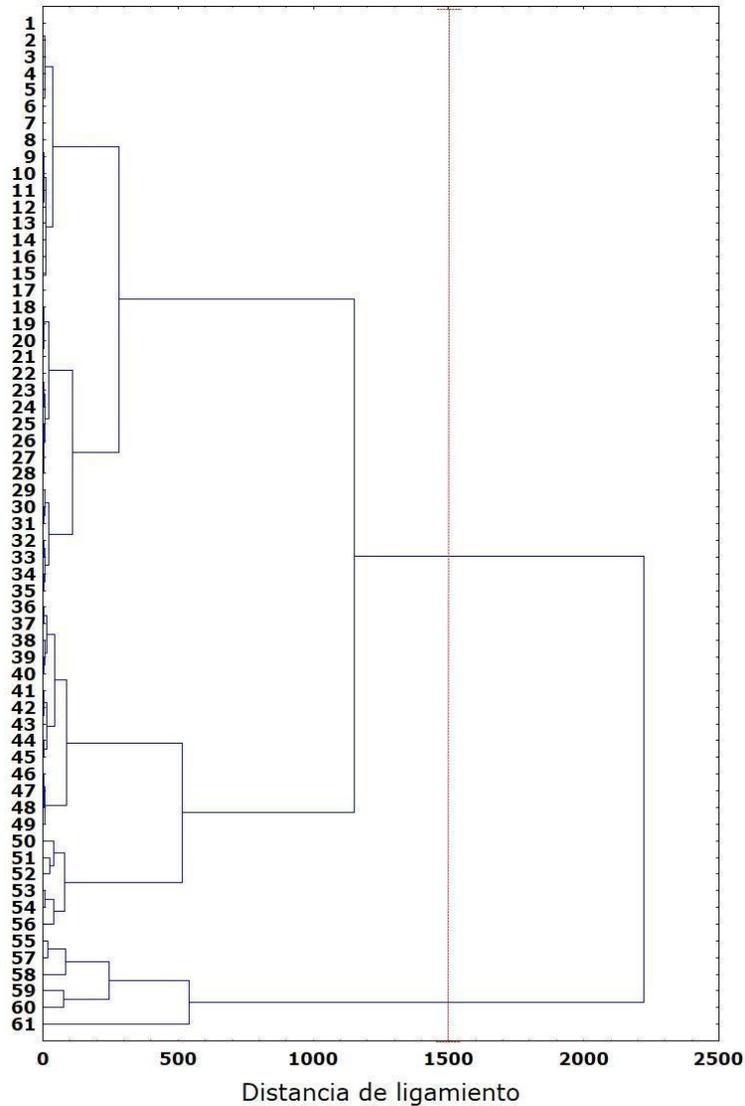


Figura 10. Gráfico de amalgamiento.

Los grupos conformados corresponden en su mayoría, con las etapas de desarrollo de los cultivos (brinjal, monte bravo, latizal y fustal) (Ronquillo-Gorgúa *et al.*, 2022). Además, es posible subdividir el fustal considerando árboles mayores de 35 metros como posibles semilleros, y en este caso, con mayor biomasa. Las características agrupadoras altura en pie, número de ramificaciones

de las raíces, peso fresco del árbol, peso fresco de la raíz, peso seco del árbol y peso seco de la raíz (Cuadro 6) no habían sido considerados previamente en las categorías sugeridas por lo que los modelos de estimación eran menos precisos, por lo que la propuesta actual resultó viable y permite una extrapolación a otras zonas con coberturas forestales similares en cuanto a la composición de especies.

Cuadro 6. Características morfológicas de los grupos formados.

Grupo	No.	Altura en pie (cm)*	Diámetro a la base (cm)	Edad (años)	No. Ramificación de raíces*	Peso fresco árbol (g)*	Peso fresco raíz (g)*	Peso seco árbol (g)*	Peso seco raíz (g)*
1	38	27.45 ± 17	0.42 ± 0.2	3.53 ± 2.2	6.11 ± 3.4	14.2 ± 16.6	3.54 ± 4.3	1.21 ± 1.8	0.36 ± 0.6
2	12	84.15 ± 13	1.19 ± 0.2	9.33 ± 0.8	10.25 ± 2.2	144.93 ± 61.2	37.7 ± 18.3	10.78 ± 36	2 ± 6.1
3	6	148.83 ± 17.9	1.95 ± 0.5	10.33 ± 1.4	15.33 ± 2.4	636.37 ± 218	168.62 ± 102.3	302.23 ± 89.2	78.12 ± 43.2
4	4	232.38 ± 47.8	3.06 ± 0.6	15 ± 1.6	20 ± 2	1366.53 ± 532.2	366.5 ± 140.2	753.3 ± 296.1	193.2 ± 70.4
5	1	356.0	6.285	19	16	3852.40	960.3	2065.34	525.3

Mediante la aplicación de la ecuación obtenida se generó la base de datos en formato .xlsx, la cual requiere ingresar el diámetro a la base y altura total del árbol de interés para obtener la biomasa radicular, este modelo alométrico se podrá aplicar en bosques de *A. religiosa* con condiciones similares al tipo de suelo, precipitación, altura sobre el nivel del mar, temperatura promedio, por mencionar algunas.

Cuantificar la biomasa presente en todos los componentes de un ecosistema permite estimar la disponibilidad de recursos, la capacidad de almacenamiento de carbono y a su vez la pérdida de este y sus factores que lo causan a través de tiempo, con el fin de elaborar estrategias para su conservación (Ramírez-Ramírez *et al.*, 2017). Dentro de estas estrategias se encuentra el pago por servicios ecosistémicos, específicamente los bonos de carbono, los cuales consisten en que países

desarrollados compran a países en desarrollo Certificados de Emisiones Reducidas, con el fin de reducir la sobreacumulación de gases de efecto invernadero. En la mayoría de los proyectos que están dentro de este mercado de carbono solo reciben pago por la vegetación presente en el componente aéreo (árboles y arbustos) ya que como se ha mencionado en este estudio resulta complejo estimar la biomasa del componente suelo, sin embargo, es necesario cuantificarlo en su totalidad con el fin de generar mayores beneficios a los poseedores de los bosques y es aquí cuando resulta altamente aplicable e importante la generación de modelos alométricos.

II.6. CONCLUSIÓN

El modelo alométrico generado para estimar biomasa radicular en bosque de *A. religiosa* fue peso fresco de la raíz $PFR = (20.918 + D (2.4475))$ que se puede utilizar en bosques con condiciones ecológicas similares al del Parque Nacional El Chico, Hidalgo. En este modelo las variables de mejor ajuste fueron diámetro a la base y altura total del árbol, por lo tanto, esta ecuación es una herramienta fiable para cuantificar la biomasa subterránea en inventarios de servicios ecosistémicos, lo que facilitará conocer de manera global la biomasa radicular contenida un bosque.

CAPÍTULO III:

**CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE BIOMASA TOTAL (AÉREA-RAÍZ) EN
ÁRBOLES EN ETAPA DE BRINZAL DE *Abies religiosa* (Kunth Schldl. et Cham.)**

III.1. RESUMEN

El desarrollo inicial del bosque es conocido como brinzal. En esta etapa la densidad de regeneración es alta, por lo que la velocidad de acumulación de biomasa es mayor. Por consiguiente, se planteó el objetivo de estimar la capacidad de almacenamiento de biomasa total (aérea-raíz) en árboles en etapa de brinzal de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo. Se extrajeron con raíz 52 ejemplares menores a 1.5 m de altura y 5 cm de diámetro basal promedio, se utilizó un rociador de mochila de agua a presión con el cual se desprendió el suelo de la raíz, posteriormente se depositó en estufa de secado a 80°C hasta alcanzar peso constante. Se establecieron 4 sitios de muestreo de 100 m² para obtener densidad de población. Los resultados muestran que los árboles de oyamel en etapa de brinzal formaron el grupo de brinzal inicial (altura 6 a 65 cm) que adquirieron 72.6 % de biomasa aérea y 27.4 % de biomasa radicular, y otro grupo brinzal desarrollado (altura 68 a 150 cm) que obtuvieron el 75.8 % de biomasa aérea y 24.2 % de biomasa radicular. La biomasa almacenada en bosque de *Abies religiosa* en etapa de brinzal fue de 103.6 kg ha⁻¹, con potencial de acumulación de biomasa aérea/raíz en relación 3:1 en claros del dosel que permitieron el establecimiento de la regeneración natural. La relación de biomasa radicular respecto a la biomasa aérea en etapa de brinzal cambia con la edad en árboles de *A. religiosa*.

Palabras clave: Biomasa aérea, biomasa radicular, área natural protegida, regeneración natural.

III.2. ABSTRACT

The initial development of the forest is known as brinzal, in this stage the regeneration density is high, so the biomass accumulation rate is higher. Therefore, the objective of this study was to estimate the total biomass storage capacity (aerial-root) in trees in the brinzal stage of *Abies religiosa* in El Chico National Park, Hidalgo. Fifty-two specimens less than 1.5 m in height and 5 cm in average basal diameter were extracted with complete root. A backpack sprayer of pressurized water was used to detach the soil from the roots, which were then deposited in a drying oven at 80 °C until constant weight was reached. Four sampling sites of 100 m² were established to obtain population density. The results show that the oyamel trees in the brinzal stage formed the initial brinzal group (height 6 to 65 cm) that acquired 72.6 % of aerial biomass and 27.4 % of root biomass, and another developed brinzal group (height 68 to 150 cm) that obtained 75.8 % of aerial biomass and 24.2 % of root biomass. The biomass stored in *A. religiosa* forest at the brinzal stage was 103.6 kg ha⁻¹, with potential accumulation of aerial/root biomass in a 3:1 ratio in canopy clearings that allowed the establishment of natural regeneration. The ratio of root biomass to aerial biomass in the brinzal stage changes with age in trees of *A. religiosa*.

Key words: storage, growth, density, regeneration.

III.3. INTRODUCCIÓN

La biomasa vegetal se forma con todos los componentes orgánicos disponibles en un ecosistema (Litton *et al.*, 2007) y es importante como fuente de energía, así como en el almacenamiento de carbono (C) y nitrógeno (N) (Peichl *et al.*, 2012; Schuler *et al.*, 2017). La capacidad que tiene un bosque de capturar carbono atmosférico tiende a disminuir en relación con el incremento de la edad del arbolado. Se sabe que en edades tempranas o intermedias es mayor la tasa de captura de carbono, debido al incremento acelerado en diámetro y altura (López-Reyes *et al.*, 2016). Lo anterior está relacionado con la velocidad de acumulación de biomasa aérea y radicular que los bosques tienen con el crecimiento neto de los árboles que son capaces de secuestrar más CO₂ del que emiten a través de la respiración. La velocidad de captura de carbono es directamente proporcional a dicho crecimiento (Casiano-Domínguez *et al.*, 2018).

Las áreas naturales protegidas (ANP) tienen como finalidad la conservación, protección y recuperación de los recursos naturales (Dávalos *et al.*, 2014; Ocampo *et al.*, 2014). Tal es el caso del Parque Nacional El Chico, que es proveedor de importantes servicios ambientales para la región montañosa del centro de México y que alberga uno de los relictos más importantes de *Abies religiosa* Kunth Schltld. et Cham. (oyamel) (CONANP, 2005). Esta especie se desarrolla en condiciones húmedas (precipitación mayor a 1000 mm) y en temperaturas bajas (temperatura media de 7 a 12 °C), por lo que el incremento de la temperatura en el planeta provoca afectaciones, manifestando modificaciones a nivel molecular, morfológico y fisiológico que se refleja en alteraciones negativas en sus primeras etapas de desarrollo (Romahn-Hernández *et al.*, 2020).

El desarrollo inicial del bosque templado es conocido como etapa de brinzal, que incluye árboles hasta de aproximadamente 1.5 m de altura y diámetro basal menor a 5 cm promedio (Hutchinson, 1993; Aguilar-Luna, 2018; Ronquillo-Gorgúa *et al.*, 2022). En la mayoría de las

ANP's de clima templado, el brinzal se establece durante el primer periodo de lluvias, después de generarse claros en el dosel que permiten la entrada de radiación solar hasta el piso forestal (Lara-González *et al.*, 2009). Generalmente se tienen densidades altas de plántulas de hasta 6100 ha en exposiciones Oeste (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2015) que con el paso del tiempo se reduce debido a competencia por factores abióticos y bióticos que alcanzan así una acumulación gradual de biomasa en la parte aérea y radicular del árbol (Bar-On *et al.*, 2018; Ronquillo-Gorgúa *et al.*, 2022).

Los estudios enfocados en estimar la acumulación de biomasa aérea en los bosques (Razo-Zárate *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2018; Albers *et al.*, 2019; Van-Pham *et al.*, 2019), no consideran la biomasa de la raíz (Addo-Danso *et al.*, 2016; Adame *et al.*, 2017; Sochacki *et al.*, 2017). Investigaciones recientes sugieren la necesidad de evaluar estimaciones puntuales por componente del total de biomasa forestal a gran escala (Djomo *et al.*, 2011; Fu *et al.*, 2017; Bar-On *et al.*, 2018).

La maquinaria, herramientas y tiempo requerido para extraer con raíz árboles adultos hace casi imposible el procedimiento, pero el interés por aportar información del componente radicular de árboles jóvenes permite complementar información para llegar a la totalidad de biomasa almacenada en el bosque de *A. religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo. Fragoso-López *et al.* (2017) estimó el componente de biomasa aérea a través de sistemas de información geográfica; así mismo, se conoce la biomasa almacenada sobre la superficie del suelo, que la nombran como necromasa (Cortés-Blobaum *et al.*, 2020), de modo que, hace falta incorporar una parte del componente radicular en este ecosistema. Por lo que el objetivo de la presente investigación fue estimar la capacidad de acumulación de biomasa total (aérea-raíz) en árboles en etapa de brinzal de *A. religiosa* en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México, para obtener la relación entre biomasa aérea con la biomasa radicular en plantas jóvenes.

III.4. METODOLOGÍA

III.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el ANP Parque Nacional El Chico, localizado en el extremo occidental de la sierra de Pachuca, Hidalgo, en el eje neovolcánico transversal (Figura 11). Se sitúa entre las coordenadas geográficas de los 20°10'10'' a 20°13'25'' latitud norte y los 98°41'50'' a 98°46'02'' de longitud oeste, cubre la extensión de 2 739 ha, sus altitudes van de los 2 600 a 3 050 m (CONANP, 2005). Su clima es templado-subhúmedo con lluvias en verano (C (m) (w) b (i0) gw) y temperatura media anual de entre 12 y 18 °C, los suelos predominantes son Cambisol húmico, Regosol dístico y Andosol húmico de textura media (CONANP, 2005). El 67 % de la cobertura vegetal pertenece a bosque de *A. religiosa* (Fragoso-López *et al.*, 2017), otras especies arbóreas listadas son: *Quercus* spp., *Pseudotsuga macrolepis* Flous, *Taxus globosa* Schltldl. y *Pinus* spp. (CONANP, 2005).

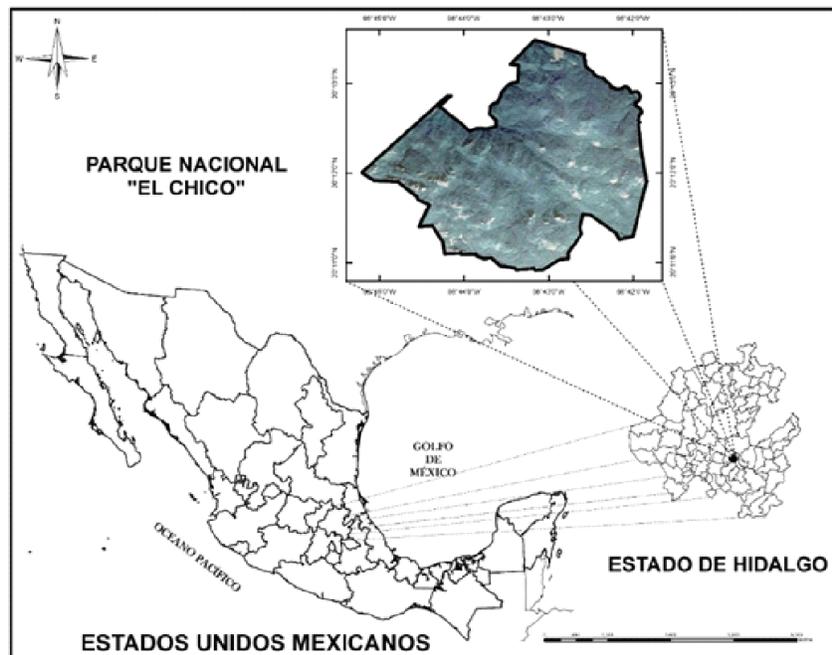


Figura 11. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico Hidalgo, México.

III.4.2. Colecta de muestras y determinación de biomasa

Se realizaron recorridos dentro del PNCH para identificar espacios (claros) dentro del bosque lo suficientemente amplios que permitieran la regeneración natural del *A. religiosa*, después se seleccionaron los árboles tomando en cuenta los criterios siguientes: alturas de 6-150 cm, libres de dañados mecánicos o muertos y alejados de caminos o brechas con suelo compactado. Los árboles seleccionados se prepararon un día antes que consistió en retirar el musgo y materia orgánica con rastrillo, después se agregó suficiente agua alrededor de la base del individuo con el fin de ablandar la tierra, al día siguiente con el uso de un rociador de mochila de agua a presión se procedió cuidadosamente a desprender el suelo de la raíz, para asegurar la extracción completa del sistema radicular de cada árbol, este se ató con una cuerda en la parte media del fuste a un soporte en forma de escuadra fijado al suelo logrando que quedara vertical durante todo el proceso de extracción hasta estar completamente libre el sistema radicular.

Se extrajeron 52 árboles de *A. religiosa* en etapa brinzal. Una vez obtenido el ejemplar se lavó la raíz y se dejó secar al aire por aproximadamente 2 horas (Fonseca *et al.*, 2009). Se tomó el peso fresco del árbol completo con báscula marca BIOBASE® modelo BE16001, posteriormente se cortó y pesó el componente raíz, después se depositó cada componente en bolsas de papel previamente etiquetadas para evitar pérdidas y se llevaron al laboratorio de Semillas y Germoplasma del Instituto de Ciencias Agropecuarias-UAEH para ser colocadas en la estufa de secado marca GRIEVE® modelo LW-201C a temperatura de 80 °C hasta alcanzar peso constante. El tamaño de la muestra fue calculado con base en datos previos para la varianza en el peso seco de la raíz de individuos en etapa de brinzal: $n = (z^2 \sigma^2) / d^2$, donde z = valor estandarizado del error al 5%, que equivale a 1.96, σ^2 = varianza del atributo a evaluar, y d = intervalo de confianza para la cualidad medida (Zar, 2010).

III.4.3. Densidad de árboles en etapa de brinzal

Se establecieron 4 sitios de muestreo para determinar la densidad en etapa de brinzal de 100 m² (10 x 10 m), ubicados en las áreas de extracción de los árboles. En cada sitio se evaluaron las variables siguientes: altura total que corresponde desde la superficie del suelo hasta el ápice del árbol, se midió con flexómetro marca Truper®, el diámetro basal fue medido con vernier digital marca Truper® con precisión al milímetro, la edad se estimó realizando el conteo del número de verticilos por individuo, dado que estos se producen a una tasa de un verticilo por año en *Abies* (Lara-González *et al.*, 2009) y la densidad de árboles en etapa de brinzal se obtuvo utilizando la formula siguiente:

$$D = N * 100$$

Donde:

D=Densidad de regeneración por hectárea

N=Número de individuos en 100 m²

III.4.4. Análisis de datos

De los 52 árboles se realizó un análisis de agrupamiento considerando las variables altura, peso seco del árbol completo, peso seco de la raíz y porcentaje de biomasa radicular, mediante el método de Ward con base en distancias euclidianas, para esto se utilizó el programa Statistica v.10 (StatSoft, 2011). La biomasa seca de raíz fue contrastada mediante una prueba de t para muestras desbalanceadas, previa prueba de normalidad. Para este análisis se utilizó el programa Past (Hammer *et al.*, 2001). El resto de los atributos se contrastaron con pruebas pareadas paramétricas o no paramétricas dependiendo de la naturaleza de los datos.

III.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de agrupamiento expuso dos grupos consistentes (Figura 12), que se distinguen principalmente por menor talla (brinjal inicial) con rango de altura de 6 a 65 cm, 0.07 a 0.9 cm de diámetro basal y edad de 1 a 8 años y otro de mayor talla (brinjal desarrollado) con rango de altura de 68 a 150 cm, 0.9 a 2.1 cm de diámetro basal y edad de 8 a 12 años. Ambos grupos se encuentran en los claros del dosel, las diferencias en altura están dadas por la edad y plantas que sirven de nodriza al oyamel. Los datos de la biomasa de la raíz se distribuyen de manera normal (Anderson-Darling, 0,4669 y 0,3743 $p > 0,05$) con 36 y 14 individuos por grupo respectivamente (Cuadro 7). La prueba pareada mostró que no difiere significativamente entre grupos ($t = 1.7468$, $p = 0.09$). Sin embargo, el resto de los atributos son diferentes significativamente (altura: $z = 5.47$, $p = 0.0001$, peso fresco del árbol: $z = 5.478$, $p = 0.0001$, peso fresco de la raíz: $z = 5.392$, $p = 0.0001$, peso seco del árbol: $z = 5.435$, $p = 0.0001$, el peso seco de la raíz: $z = 5.482$, $p = 0.0001$).

El análisis de agrupamiento muestra que los atributos de las plantas varían a lo largo del periodo de la etapa de desarrollo de brinjal. Tal heterogeneidad pone de manifiesto las tasas diferenciales en acumulación de biomasa, dependiendo de la edad de las plantas más allá de las particularidades del medio donde crecen, ya que las muestras fueron extraídas de parcelas ambientalmente homogéneas. Por tanto, la variación en la proporción que ocupa la raíz dentro de la biomasa total de un árbol es cambiante, por lo que no es posible asumir un incremento lineal a lo largo de la vida de la planta y se requiere establecer cuál es el patrón adecuado que explique dicho incremento. Algunos trabajos han mencionado que la proporción biomasa de raíz/biomasa aérea son interdependientes, lo que resalta la importancia en el equilibrio funcional de ambas partes (Van Noordwijk & Willigen, 1987). Sin embargo, la tasa de crecimiento de ambos elementos difiere en función del contenido hídrico del suelo, procesos biofísicos, cambios en la tasa de

elongación foliar dependiente del periodo reproductivo, estrés de la planta, hacinamiento, competencia, entre otros (Krizek *et al.*, 1985; Macklon *et al.*, 1994). La simplificación del crecimiento a un modelo logarítmico entre el crecimiento de las raíces y la parte aérea solo aplicaría a las fases de crecimiento vegetativo y en condiciones del medio no limitantes (Russell, 1977).

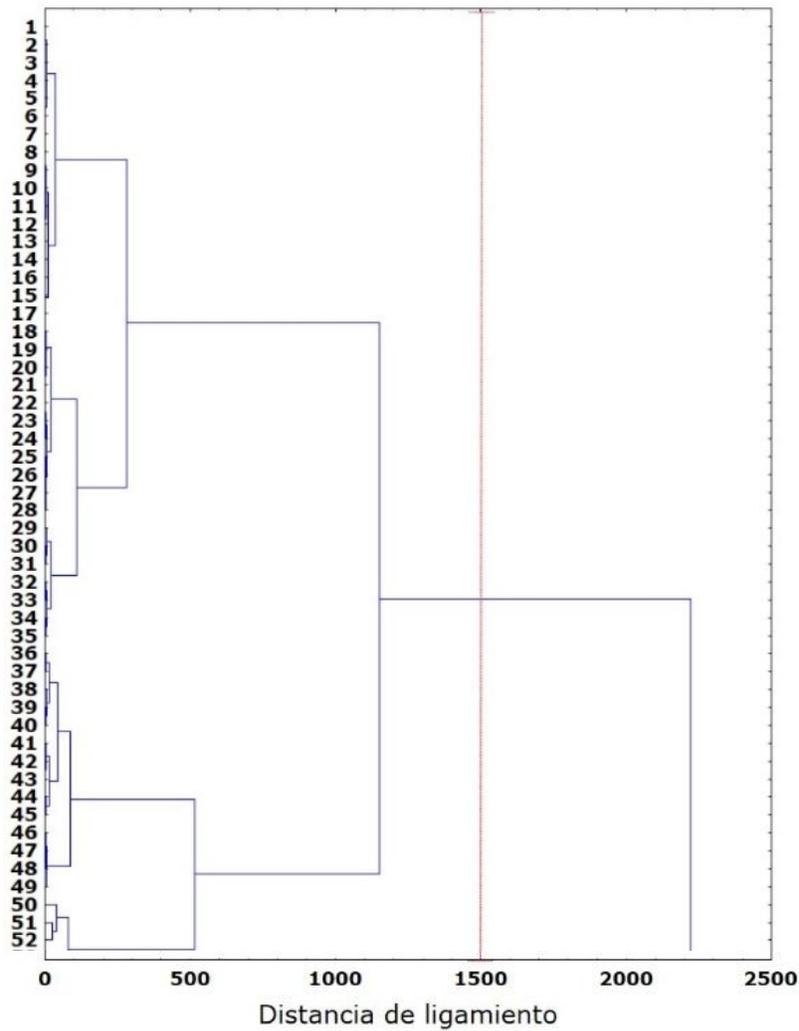


Figura 12. Agrupamiento por atributos morfológicos en plantas de *A. religiosa* en etapa de brinjal.

Cuadro 7. Análisis de agrupamiento de contenido de biomasa seca en plantas de *A. religiosa* en etapa de brinzal.

Grupo	Biomasa radicular (%)	Biomasa Aérea (%)	Desviación estándar	Número de individuo
Brinzal inicial	27.4	72.6	6.172	38
Brinzal desarrollado	24.2	75.8	5.862	14

III.5.1. Biomasa por componente

Los resultados en biomasa seca por componente muestran que los árboles en el grupo brinzal inicial tienen el 72.6 % de biomasa aérea y el 27.4 % de biomasa radicular (Figura 13), mientras en el grupo identificado como brinzal desarrollado, el 75.8 % corresponde a biomasa aérea y el 24.2 % a biomasa radicular (Figura 14). Esta tasa de cambio debe ser considerada en los cálculos de fijación de carbono en áreas de regeneración con diferente tamaño de planta ya que puede tener mayor cantidad en plantas jóvenes. Estudios previos han mostrado que existe un incremento significativo de hasta cinco puntos porcentuales en la producción de raíces en suelos restrictivos (Guerra *et al.*, 2005), lo que podría modificar los resultados obtenidos si se contrastan en condiciones con menor calidad nutrimental del suelo.

Diversos autores estiman que del 20 al 40 % de la biomasa de los bosques está compuesta por raíces (Brunner y Godbold, 2007; Finér *et al.*, 2011; Sochacki *et al.*, 2017). El rango que manejan se debe a que la cantidad de biomasa cambia de acuerdo con la especie, condiciones climáticas y el ecosistema en el que se desarrollan.

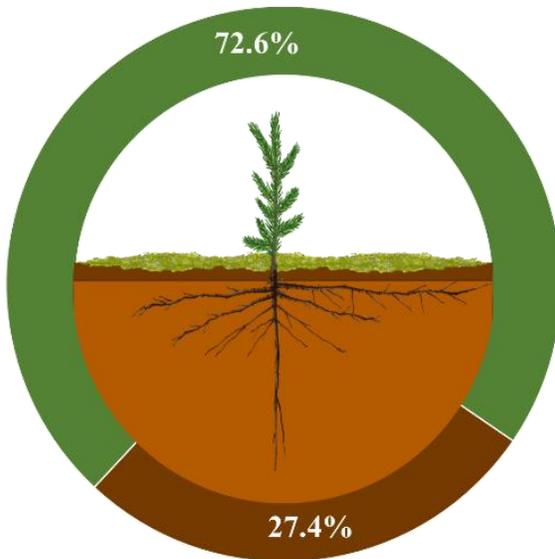


Figura 13. Biomasa aérea y radicular en árboles de brinzal inicial (6 a 65 cm de altura).

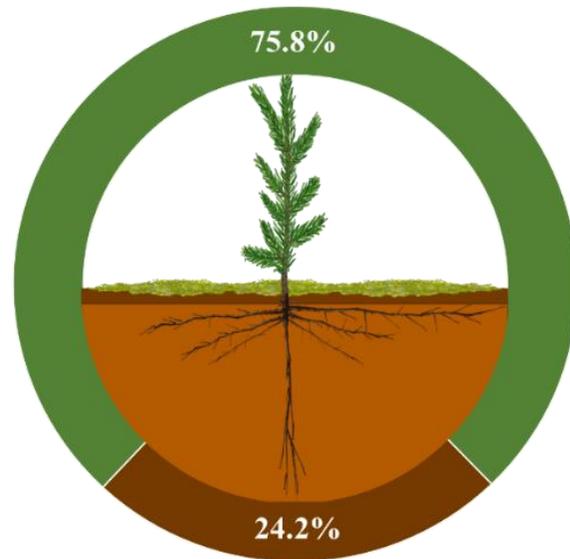


Figura 14. Biomasa aérea y radicular en árboles de brinzal desarrollado (68 a 150 cm de altura).

III.5.2. Potencial de biomasa almacenada

Se estimó una densidad de regeneración promedio de 3 925 árboles/ha⁻¹ en etapa de brinzal. Sin embargo, este resultado podría estar sobreestimado ya que los sitios de muestreo se ubicaron en espacios claros del dosel donde las condiciones ambientales permitieron la regeneración de *A. religiosa*. Pero, bajo el dosel de los árboles adultos la densidad fue escasa, debido a la poca radiación solar que llega al piso forestal donde regularmente las plantas no se establecen (Lara-González *et al.*, 2009). Datos contrastantes registró Hernández-Ramírez *et al.* (2022) al reportar el porcentaje de plántulas muertas bajo dosel parcialmente cerrado fue de 79 % (n = 803) mientras que bajo claros de luz fue de 70.1 % (n = 384). Referente al porcentaje de plántulas vivas a la semana 53 bajo dosel parcialmente cerrado fue de 17.9 % (n = 182) mientras que bajo claros de luz fue de 28.1 % (n = 154). Por otra parte, el potencial de biomasa total (aérea y raíz) almacenada en *A. religiosa* en etapa de brinzal fue de 103.6 kg ha⁻¹ (Figura 15), cabe destacar la relación parte aérea/raíz encontrada fue de 3:1, es decir, 3 partes corresponde a biomasa aérea y una parte a

biomasa radicular. Lo que contribuye a mantener el carbono orgánico bajo el suelo induciendo su estabilidad a través del proceso de mineralización que ocurre con el tiempo, así mismo Sandoval *et al.* (2014), mencionan que la lignina contenida en la madera de las raíces es un componente recalcitrante que estabiliza el carbono orgánico del suelo durante décadas. De igual manera los bosques de Oyamel tienen un contenido alto de lignina que los bosques de Pino (Avendaño-Hernández *et al.*, 2009; Leifeld y Kögel, 2005).

Se ha documentado que la competencia de raíces es considerada un factor que influye en la determinación de la estructura, extensión, distribución de la raíz y en ocasiones tiende a reducir su profundidad, configuración y densidad (Curt y Prévosto, 2003; Bolte y Villanueva, 2006; Rewald y Leuschner, 2009), por lo que la competencia entre raíces podría representar un elemento crucial en la reducción del porcentaje de la biomasa radicular durante el crecimiento del *A. religiosa* en el Parque Nacional El Chico.

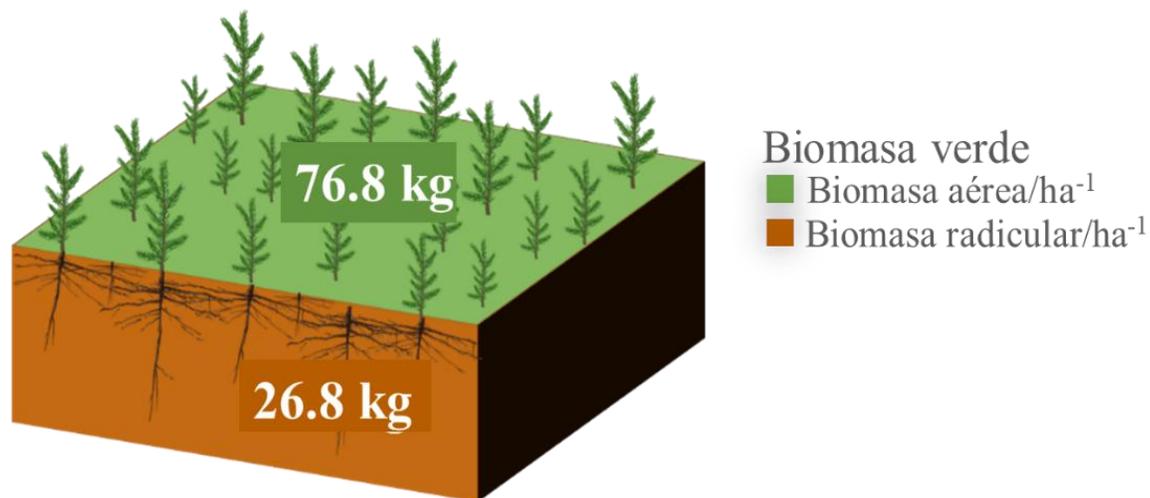


Figura 15. Potencial de almacenamiento de biomasa aérea y radicular por hectárea de árboles de oyamel en etapa de brinzal en el Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

III.6. CONCLUSIÓN

Los bosques de *A. religiosa* en la etapa de brinjal tienen potencial de acumular biomasa aérea/raíz en relación 3:1 en claros del dosel donde las condiciones permitieron el establecimiento de la regeneración natural. Las plantas pequeñas de 1 a 8 años en promedio almacenan más biomasa radicular en porcentaje que las plantas de mayor tamaño con edad de 8 a 12 años en la misma etapa de brinjal. En otras palabras, la relación de biomasa radicular respecto a la biomasa aérea en etapa de brinjal cambia con la edad en árboles de *A. religiosa*.

CAPÍTULO IV:
CANTIDAD DE RAÍCES PRESENTES EN LOS PRIMEROS 30 CM DE PROFUNDIDAD
DEL SUELO

IV.1. RESUMEN

Utilizar vegetación que aporte gran cantidad de raíz al suelo es una estrategia que contribuyen a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, las raíces de los árboles son la parte de la vegetación menos estudiada y entendida de los ecosistemas, por lo que el objetivo del presente capítulo fue determinar el contenido de raíces en los primeros 30 cm de profundidad del suelo. Para lo cual se realizó la siguiente metodología, se excavaron 12 bloques de 30×30×30 cm de largo, ancho y profundidad. Se separó todo tipo de raíz presente y se secaron en estufa hasta peso constante. Los resultados obtenidos indican que el promedio de biomasa seca de raíces obtenida por cada bloque es de 0.057 kg, y la cantidad por hectárea de 6.38 toneladas y 7,855.31 toneladas en las 1,229.65 ha. El coeficiente de carbono obtenido en las raíces es de 43.79%, lo que representa que existe 3,439.84 Mg ha⁻¹ de carbono orgánico en el Parque Nacional El Chico Hidalgo. Estos resultados permitirán que se pueden sumar al carbono almacenado en otros componentes para la estimación más precisa de este servicio ambiental del bosque.

Palabras clave: Raíces, carbono, biomasa radicular, área natural protegida.

IV.2. ABSTRACT

Using vegetation that provides a large number of roots to the soil is a strategy that contributes to the mitigation of climate change. However, tree roots are the least studied and understood part of the vegetation in ecosystems, so the objective of this chapter was to determine the root content in the first 30 cm of soil depth. For this, the following methodology was carried out: 12 blocks of 30x30x30 cm in length, width and depth were excavated. All types of roots present were separated and dried in an oven until constant weight. The results obtained indicate that the average dry root biomass obtained per block is 0.057 kg, and the amount per hectare is 6.38 tons, and 7,855.31 tons in the 1,229.65 ha. The carbon coefficient obtained in the roots is 43.79%, which represents a total of 3,439.84 Mg ha⁻¹ of organic carbon in El Chico Hidalgo National Park. These results will allow the carbon stored in other components to be added for a more accurate estimate of this environmental service of the forest.

Keywords: Roots, carbon, root biomass, protected natural area.

IV.3. INTRODUCCIÓN

En el primer metro de profundidad del suelo del mundo se tiene almacenado aproximadamente 1,500 Pg de carbono, mientras que en la vegetación terrestre 550 Pg y en la atmósfera 750 Pg, (Cantú Silva & Luna Robles, 2022), por lo que el suelo es considerado un elemento muy importante en la regulación de las emisiones y captura de gases de efecto invernadero. El mejorar la calidad del suelo mediante la utilización de vegetación que aporte gran cantidad de raíz, así como, el mantenimiento de la cobertura vegetal durante la mayor parte del año son estrategias que contribuyen a mitigar el cambio climático (Caviglia *et al.*, 2016).

El suelo está constituido por una mezcla de minerales, aire, agua, fragmentos de rocas, biomasa microbiana y materia orgánica. El contenido de carbono orgánico del suelo depende de la profundidad a la que este es medido, siendo principalmente en los primeros 20-30 cm su mayor actividad y a medida que incrementa la profundidad disminuye su contenido (Kurniatun *et al.*, 2011).

Las raíces desempeñan un papel clave para los árboles: absorben agua y nutrientes del suelo, almacenan compuestos de carbono y proporcionan estabilización física, debido a que constituyen entre el 20 - 40% de la biomasa forestal, además, las raíces finas de los árboles experimentan una renovación constante, que proporcionan un gran aporte de biomasa al suelo, que contiene carbono y nutrientes minerales (Brunner & Godbald, 2007).

Las raíces se dividen en raíces finas (<5 mm de diámetro) y gruesas (>5 mm de diámetro); las primeras se encargan principalmente de la absorción de agua y nutrientes del suelo que abastecen a toda la planta, mientras que las segundas proporcionan anclaje y sostén, además de soporte al suelo (Quinto Mosquera *et al.*, 2016, Sierra *et al.*, 2001).

Sin embargo, las raíces de los árboles son la parte de la vegetación menos estudiada y entendida de los ecosistemas (Smithwick *et al.*, 2014) su limitada información se debe a la dificultad para obtener los sistemas radiculares completos y por la gran cantidad de trabajo que implica la medición individual, que en ocasiones requiere máquinas pesadas en su extracción (Wang, 2006; Niiyama *et al.*, 2010; Alongi, 2014), otro tanto puede decirse del reducido marco conceptual y terminología existente (Smithwick *et al.*, 2014). Por consiguiente, hay que destacar que las metodologías propuestas hasta ahora manifiestan que son complicados para evitar pérdidas de raíces y cierto porcentaje se rompen durante la excavación (Niiyama *et al.*, 2010). Entonces las estimaciones de biomasa de raíces en árboles son escasas, lo que conlleva a desconocer datos concisos de la reserva global de carbono (Alongi, 2014).

En el presente estudio se planteó determinar el contenido de raíces en los primeros 30 cm de profundidad del suelo en bosque de *Abies religiosa*, donde además se identificaron otras especies arbóreas y arbustivas, tales como, *Acaena elongata* L., *Amelanchier denticulata* (HBK.) Koch, *Arbutus glandulosa* Mart. & Gal., *Baccharis conferta* HBK., *Buddleja cordata* HBK., *Buddleja parviflora* HBK., *Cestrum roseum* HBK., *Crataegus pubescens* (HBK.) Steud., *Eupatorium ligustrinum* D.C., *Eupatorium glabratum* HBK., *Fucrea bendinghaussii* C. Koch., *Ilex toluicana* Hemsl., *Juniperus monticola.*, *Litsea glaucescens*, *Lonicera mexicana* (HBK.) Rehder., *Prunus serotina* (Cav.) McVaugh, *Quercus eduardii* Trel., *Quercus microphylla* Née, *Ribes affine* HBK., *Senecio barbajohannis* DC., *Senecio platanifolius* Benth., *Senecio vulgaris* L., *Symphoricarpos microphyllus* HBK.

IV.4. METODOLOGÍA

IV.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el Área Natural Protegida con el nombre del Parque Nacional El Chico, localizado en el extremo occidental de la Sierra de Pachuca, Hidalgo, en el Eje Neovolcánico Transversal (Figura 16). Se sitúa, geográficamente, entre las coordenadas extremas de los 20°10'10'' a 20°13'25'' latitud Norte y los 98°41'50'' a 98°46'02'' de longitud Oeste, cubre la extensión de 2,739 hectáreas, sus altitudes van de los 2600 a 3050 msnm (CONANP, 2005). Su clima es templado-subhúmedo con lluvias verano (C (m) (w) b (i) gw) y temperatura media anual de entre 12 y 18 °C, los suelos predominantes son Cambisol húmico, Regosol dístrico y Andosol húmico de textura media (CONANP, 2005). El 67% de la cobertura vegetal pertenece a bosque de *A. religiosa* (Fragoso-López *et al.*, 2017), otras especies listadas son: *Quercus spp.*, *Pseudotsuga macrolepis* Flous, *Taxus globosa* Schl. y *Pinus spp.* (CONANP, 2005).

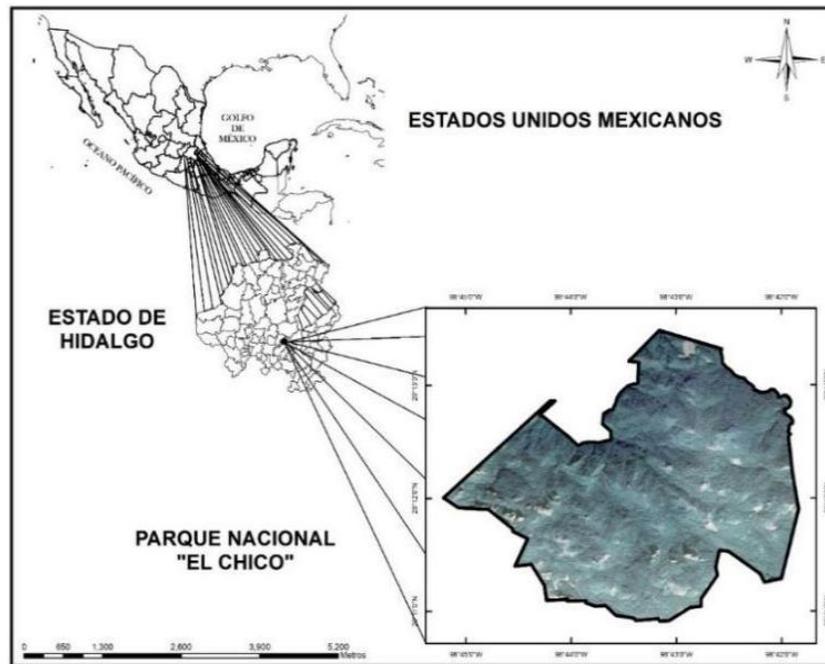


Figura 16. Ubicación geográfica del Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

IV.4.2. Muestreo

El área de estudio se centra en el 67 % de la vegetación presente en el PNCH que pertenece al bosque de *A. religiosa*, que corresponde a la superficie de 1,229.65 hectáreas, distribuido en 6 rodales, como se muestra en la figura 17.

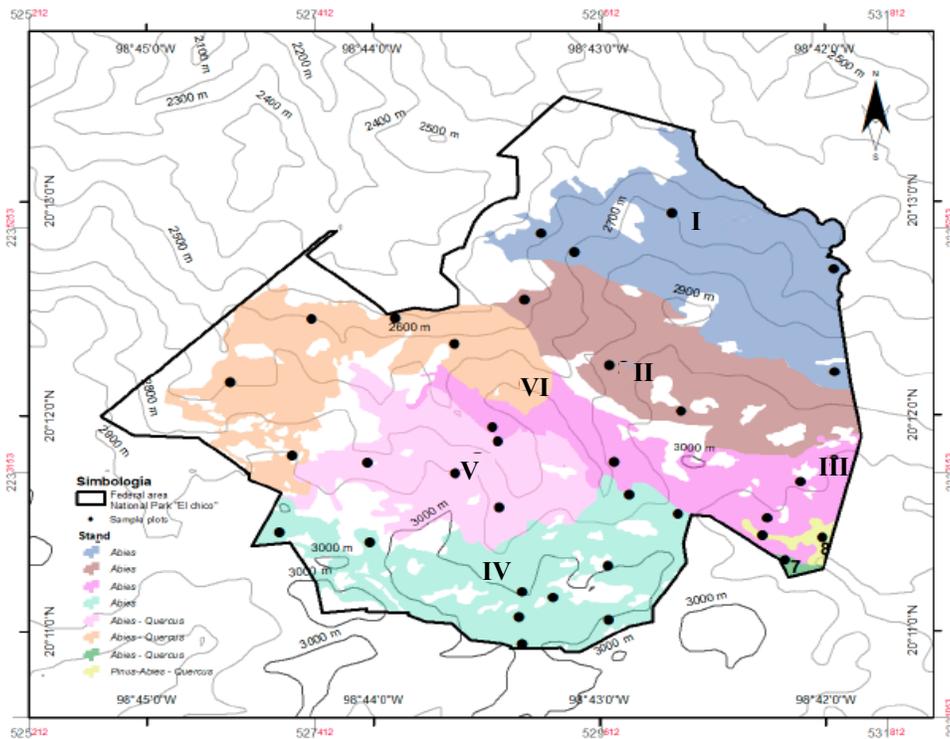


Figura 17. Distribución de puntos de muestreo en los rodales de bosque de *A. religiosa* del Parque Nacional El Chico de acuerdo con su vegetación. Imagen modificada de Frago-López *et al.* (2017).

IV.4.3. Extracción de raíces

Se planteó una profundidad de medición de 30 cm de acuerdo con estudios previos de medición de raíces horizontales (Gayoso *et al.*, 2000, Fonseca *et al.*, 2011, Monárrez-González *et al.*, 2018). Para estimar la cantidad de raíces presentes en los primeros 30 cm de profundidad del suelo se excavaron 12 bloques de 30×30×30 cm de largo, ancho y profundidad (Figura 18) (Fonseca *et al.*, 2011), los sitios de muestreo se localizaron dos por cada cuadrante en el que se divide el

bosque de *A. religiosa*. Estos se ubicaron en un claro, a una distancia mínima de 3 m de árboles adultos, ya que sus raíces gruesas podrían ocupar toda la superficie del bloque.



Figura 18. Obtención de la muestra de raíces en bloques de 30×30×30 cm en el bosque de *A. religiosa*.

El procedimiento que se siguió fue delimitar el bloque con estacas, excavar y colocar el suelo extraído en una tina donde se separaron las raíces del suelo cuidadosamente (Figura 19) y se almacenaron en bolsas de papel previamente identificadas, para posteriormente ser lavadas con el uso de una coladera con el fin de retirar partículas de suelo que aún podrían estar adheridas y evitar la sobre estimación. Posteriormente se dejaron secar al ambiente por dos horas y se tomó el peso fresco con una báscula marca BIOBASE® modelo BE1600 (Fonseca *et al*, 2011), nuevamente se colocaron en bolsas de papel identificadas y se llevaron al laboratorio de Semillas y Germoplasmas del Instituto de Ciencias Agropecuarias-UAEH para ser colocadas en la estufa de secado marca GRIEVE® modelo LW-201C a temperatura de 80 °C hasta alcanzar peso constante y se tomó el peso en seco.



Figura 19. Separación de las raíces gruesas y finas del suelo presentes desde el piso hasta 30 cm de profundidad.

IV.4.4. Obtención de raíces

Para determinar el carbono en las raíces, se seccionaron con tijeras de jardinería en partes pequeñas (Figura 20), se mezclaron y la muestra compuesta fue introducida en el molino tipo mortero marca RETSCH® modelo RM200 (Figura 21) hasta que las partículas quedaron molidas de tamaño similar a la arcilla, se utilizó el tamiz del No. 35 y almacenaron en bolsas ziploc (Figura 22). Posteriormente en el Área Académica de Química del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería-UAEH se determinó el contenido de carbono orgánico utilizando el equipo TOC-L modelo SSM-5000A marca SHIMADZU®, en el módulo de muestras sólidas (Figura 23). Se pesaron 10 mg de la muestra en Bolts (recipientes) previamente se esterilizaron en ácido nítrico al 5% y posteriormente en una Mufla marca LINDBERG BLUE® modelo Box Furnace durante una hora, con la báscula analítica marca AND® modelo GR-120, para evitar contaminación de las

muestras o que se humedecieran mientras se utilizaban se colocaron en cajas Petri y estas a su vez en desecador (Figura 24).



Figura 20. Muestra de raíces secas extraídas.



Figura 21. Trituración de las muestras de raíces.



Figura 22. Muestras preparadas.

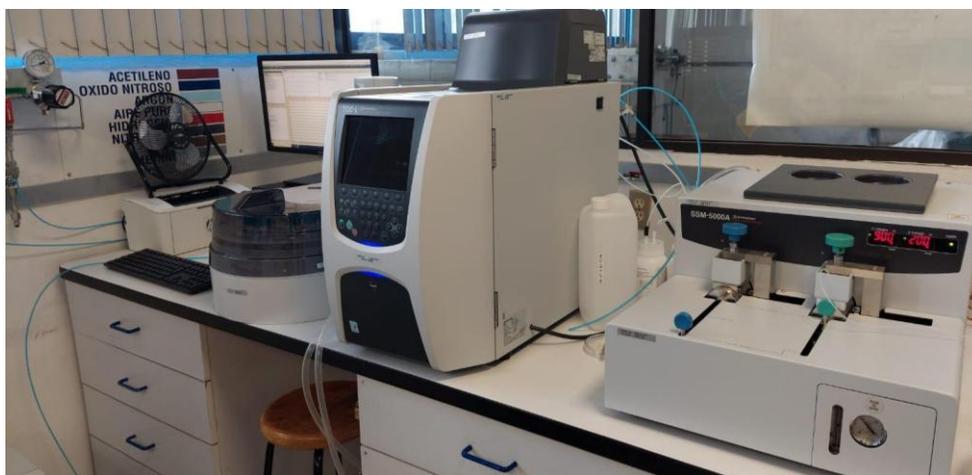


Figura 23. TOC-L modelo SSM-5000A marca SHIMADZU®.



Figura 24. Pesado y preparación de las muestras.

IV.4.5. Determinación de biomasa seca y carbono orgánico en raíces

Para determinar la biomasa seca de raíces presente en los primeros 30 cm de profundidad consistió en extraer el volumen completo de los bloques 30x30x30 (Figura 25) cm y separar las raíces totales por sitio las cuales se secaron hasta obtener el peso constante. Los valores obtenidos por sitio se sumaron y se sacó el promedio general de la biomasa seca en el volumen del bloque. De la misma manera se obtuvo el valor promedio general de la concentración de carbono que contienen las raíces presentes en los 30 cm de profundidad de suelo en el bosque de oyamel.

La cantidad de biomasa contenida en las raíces por hectárea en los primeros 30 cm del suelo en bosques de oyamel, se determinó de la manera siguiente:

- Se obtuvo el volumen de la superficie de 1 m², con la profundidad de 30 cm y del bloque, obteniendo el número de bloques que están dentro de la superficie.
- Se aplicó la siguiente fórmula para obtener la biomasa seca total en las raíces en una hectárea.

$$R = (BS * PBB) * 10,000$$

Donde:

BR= Biomasa de raíces por hectárea

BS = Bloques en la superficie

PBB= Promedio de biomasa obtenida en los bloques en kg

Se obtuvo la biomasa de raíces presente en las 1,229.65 ha de bosque de *A. religiosa*.

- Y se aplicó el promedio del coeficiente de carbono orgánico obtenido.

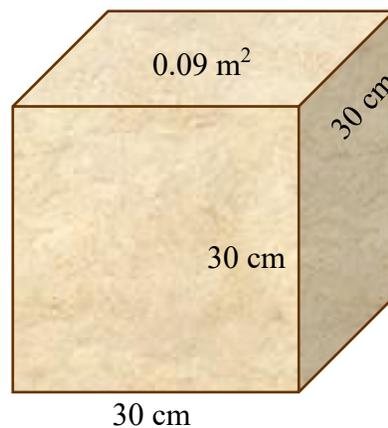


Figura 25. Dimensión de los bloques excavados.

IV.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 8 se muestran los resultados obtenidos de los 12 bloques extraídos en el muestreo de raíces, en estos estuvieron cerca la mayoría de las especies arbóreas y arbustivas identificadas en el bosque de *A. religiosa*. El peso obtenido en cada bloque se vio influenciado por diversos factores, pero principalmente, la forma y distribución del sistema radicular, producción de raíces gruesas y raíces finas de cada especie, cercanía, estado de desarrollo y o edad de los individuos presentes (Guerra *et al.*, 2005), por lo que entre el resultado más alto y el más bajo existió una gran diferencia, en el sitio 9 con 459.2 g, mientras que en el sitio 5 con 25.8 g.

Cuadro 8. Biomasa seca en raíces y Carbono presentes desde el piso hasta 30 cm de profundidad del suelo.

No. de sitio	Peso Seco raíz (g)	Carbono raíz (%)
Sitio 1	50.4	45.06
Sitio 2	62.9	42.68
Sitio 3	89.2	46.52
Sitio 4	52.1	44.89
Sitio 5	25.8	37.03
Sitio 6	32.0	42.66
Sitio 7	146.8	41.36
Sitio 8	65.6	47.59
Sitio 9	459.2	47.13
Sitio 10	220.0	44.62
Sitio 11	36.0	46.18
Sitio 12	40.0	39.56
Promedio	106.66	43.77

En base a la gran diferencia que existe en el peso del bloque más alto y el más bajo y a que no se tiene una moda de datos, se decidió realizar un ordenamiento de los datos de mayor a menor y obtener la media, siendo el sitio 4 y 2 (cuadro 9), se obtuvo un promedio de la media del peso seco de 57.5 g y un promedio de coeficiente de carbono de 43.79%.

Cuadro 9. Ordenamiento de los bloques, media y promedio.

No. de sitio	Peso Seco raíz (g)	Carbono raíz (%)
Sitio 5	25.8	37.03
Sitio 6	32.0	42.66
Sitio 11	36.0	46.18
Sitio 12	40.0	39.56
Sitio 1	50.4	45.06
Sitio 4	52.1	44.89
Sitio 2	62.9	42.68
Sitio 8	65.6	47.59
Sitio 3	89.2	46.52
Sitio 7	146.8	41.36
Sitio 10	220	44.62
Sitio 9	459.2	47.13
Promedio de	57.5	43.79
la media		

Mediante la metodología planteada se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) Volumen de la superficie de 1 m², con la profundidad de 30 cm y del bloque.

Volumen de la superficie de 1 m²

$$VS = 1 m * 1 m * 0.3 m = 0.3 m^3$$

Volumen de 1 bloque

$$VB = 0.3 m * 0.3 m * 0.3 m = 0.027 m^3$$

Bloques en la superficie

$$BS = \frac{0.3 m^3}{0.027 m^3} = 11.11 \text{ bloques}$$

11.11 bloques están en un 1 m², con la profundidad de 30 cm.

b) Biomasa seca total en las raíces en una hectárea.

$$BR = (BS * PBB) * 10,000$$

$$BR = (11.11 * 0.0575 kg) * 10,000 = 6,388.25 kg/ha$$

BR= Biomasa de raíces por hectárea

BS = Bloques en la superficie

PBB= Promedio de biomasa obtenida en los bloques en kg

c) Biomasa de raíces presente en las 1,229.65 ha de bosque de *A. religiosa*.

$$BRT = 6,388.25 kg/ha * 1,229.65 ha = 7,855,311.61 kg = 7,855.31 tn$$

d) Promedio del coeficiente de carbono orgánico:

$$COT = 7,855.31 tn * 43.79 \% = 3,439.84 Mg$$

COT = Carbono orgánico total

El contenido de raíces en una hectárea en los primero 30 cm es de 6,388.25 kg, es decir 6.38 toneladas, lo que representa 7,855.31 toneladas en las 1,229.65 hectáreas que cubre el bosque de *A. religiosa*. El coeficiente de carbono obtenido en las raíces es de 43.79%, aplicado a los resultados obtenidos tenemos un almacenamiento de 3,439.84 Mg de carbono orgánico (Cuadro 10). Comparando estos datos con un estudio donde estimaron el carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés mediante ecuaciones alométricas únicamente en especies arbóreas, los datos obtenidos en los 4 rodales que muestrearon son de 20, 27, 48 y 79 Mg h⁻¹.

Cuadro 10. Biomasa y carbono almacenado en raíces presentes en los primeros 30 cm de profundidad del suelo.

	Biomasa (tn)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
1 hectárea	6.38	2.80
1,229.65 ha	7,855.31	3,439.84

Los datos anteriores comprueban información de diversos autores donde refieren a que la biomasa de las raíces es un importante reservorio de carbono en los bosques templados y tropicales (Sierra *et al.*, 2001, Guerra *et al.*, 2005, Brunner y Godbold, 2007; Finér *et al.*, 2011; Quinto Mosquera *et al.*, 2016, Sochacki *et al.*, 2017), destacando a los bosques de oyamel como uno de los que más almacenan biomasa y capturan carbono (Acosta–Mireles *et al.*, 2013, Pérez-Ramírez *et al.*, 2013, Bolaños González *et al.*, 2017, Acevedo-Sandoval *et al.*, 2025).⁷

Acosta–Mireles y colaboradores en 2009, determinaron el carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham., obteniendo como resultado que en el rodal donde se encuentra Oyamel y pino se concentra la mayor cantidad de carbono con 301.9 Mg ha⁻¹ y que, en todos los rodales muestreados, la mayor cantidad de carbono se concentró en la parte subterránea, principalmente en los primeros 20 cm.

Pavón y colaboradores en 2012 realizaron un estudio donde determinaron la biomasa raíces finas y gruesas en un bosque templado con manejo forestal de corte selectivo y un bosque templado conservado, en Hidalgo, los resultados mostraron que la biomasa promedio de raíces no difirió significativamente entre sitios, en el bosque con manejo forestal fue de 3.05 Mg·ha⁻¹ y en el bosque

conservado de $3.39 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, llegando a la conclusión de que un bosque bajo prácticas de manejo mantienen una biomasa radicular similar, sin embargo, el manejo forestal involucra métodos de regeneración del bosque, que dan paso al desarrollo de nuevas especies, permitiendo una mayor captación de CO_2 en los individuos jóvenes (Monárrez-González *et al.*, 2018).

En el Parque Nacional El Chico, evaluaron las fracciones de carbono del suelo bajo diferentes tipos de vegetación, divididos en bosque de oyamel, oyamel-tlaxcal, cedro, oyamel-encino, pino-encino en condiciones edáficas y climáticas similares, determinando que en suelos de oyamel son las que tienen una mayor retención de CO_2 (Acevedo-Sandoval *et al.*, 2025).

IV.6. CONCLUSIÓN

Las raíces desempeñan diversas funciones en los árboles, dentro de las más importantes está el almacenamiento de biomasa y carbono; en el bosque de *A. religiosa* en el Parque Nacional El Chico se almacena aproximadamente en las 1,229.65 ha una biomasa de 7,855.31 toneladas en las raíces presentes en los primeros 30 cm de profundidad, lo que significa 3,439.84 Mg ha⁻¹ de carbono orgánico, que se pueden sumar al carbono almacenado en otros componentes para la estimación más precisa de este servicio ambiental del bosque.

7. CONCLUSIÓN GENERAL

En el Parque Nacional El Chico es reconocido por su belleza y su gran valor de conservación aportando servicios ecosistémicos, como es la captura de carbono, que realiza mediante la fotosíntesis, en su bosque de *Abies religiosa* que comprende una superficie de 1,229.65 ha, en el cual se generan 4,069.5 toneladas de hojarasca seca y aportando 2,034.7 toneladas de carbono al suelo en un año.

Los árboles de *A. religiosa* en etapa de brinzal, respecto a su relación Biomasa aérea/raíz, formaron 2 grupos el de brinzal inicial (altura 6 a 65 cm) que corresponden al 72.6 % de biomasa aérea y 27.4 % de biomasa radicular, y el grupo de brinzal desarrollado (altura 68 a 150 cm) que obtuvieron el 75.8 % de biomasa aérea y 24.2 % de biomasa radicular, el potencial de acumulación de biomasa aérea/raíz tiene una relación de 3:1 y una biomasa almacenada de 103.6 kg ha⁻¹.

Se generó un modelo alométrico que, mediante la obtención de las tres variables Altura, edad y diámetro a la base, permitirá determinar el contenido de biomasa fresca de raíz en bosques maduros de *A. religiosa*, facilitando evaluar de manera global el contenido de carbono y poder realizar aportaciones para su conservación.

La acumulación de biomasa en las raíces en los primeros 30 cm es de 14,573.35 toneladas y 6,378.88 toneladas de carbono.

En el bosque de *A. Religiosa*, presente en el Área Natural Protegida Parque Nacional El Chico, se capturan y almacenan grandes cantidades de carbono, por lo que representa una de las áreas más importante para la mitigación del cambio climático, es importante realizar investigaciones y trabajos que permitan seguir conservando su vegetación, majestuosos paisajes y todos servicios ambientales que este ofrece.

8. REFERENCIAS

- Acevedo-Sandoval, O., Romero-Natale, A., Romo-Gómez, C., Camacho-López, C., Levy-Morales, J., & González-Ramírez, C. (2025). Distribution of Carbon Fractions and Necromass in Forest Soils Across Different Vegetation Types in El Chico National Park, Hidalgo, Mexico. *ARPHA Preprints*, 6, e149211.
- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., & Díaz Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114.
- Adame, M. F., Cherian, S., Reef, R., & Stewart-Koster, B. (2017). Mangrove root biomass and the uncertainty of belowground carbon estimations. *Forest ecology and management*, 403, 52-60.
- Addo-Danso, S. D., Prescott, C. E., & Smith, A. R. (2016). Methods for estimating root biomass and production in forest and woodland ecosystem carbon studies: a review. *Forest Ecology and Management*, 359, 332-351.
- Aguilar Luna, J. M. E. (2018). Estructura y diversidad de la vegetación arbórea de un bosque de galería en el estado de Puebla. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(47), 230-252.
- Albers, A., Collet, P., Benoist, A., & Hélias, A. (2019). Data and non-linear models for the estimation of biomass growth and carbon fixation in managed forests. *Data in Brief*, 103841.
- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual review of marine science*, 6, 195-219.

- Amaguaya Llamuca, J. L. (2015). *Determinación de carbono en el suelo de bosque nativo de ceja andina en el sector Guangra, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Argüelles-Moyao, A., Garibay-Orijel, R., Márquez-Valdelamar, L. M., & Arellano-Torres, E. (2016). Clavulina-Membranomyces is the most important lineage within the highly diverse ectomycorrhizal fungal community of *Abies religiosa*. *Mycorrhiza*, 27(1), 53–65.
- Avendaño-Hernández, D. M., M. Acosta-Mireles, A. F., Carrillo-Anzures F. y J. D. Etchevers Barra (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnica Mexicana*. 32(3):233–238.
- Barrionuevo, S. A., & Pan, E. (2009). Evaluación del CO₂ almacenado en la vegetación del bosque nativo de Santiago del estero (Argentina): Bases para la conservación de bosques en regeneración. *Foresta Veracruzana*, 11(2).
- Bar-On, Y. M., Phillips, R., & Milo, R. (2018). The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(25), 6506-6511.
- Basuki, TM, van Laake, PE, Skidmore, AK y Hussin, YA (2009). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea en bosques tropicales de dipterocarpaceas de tierras bajas. *Gestión y ecología forestal*, 257(8), 1684–1694.
- Blasco, M., & Burbano, H. (2015). La vida en el suelo: Notas sobre su bioquímica y microbiología. *Impresos la Castellana of Pasto, Colombia*.
- Bolaños González, Y., Bolaños González, M. A., Paz Pellat, F., & Ponce Pulido, J. I. (2017). Estimación de carbono almacenado en bosques de oyamel y ciprés en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 35(1), 73-86.

- Bolte, A., & Villanueva, I. (2006). Interspecific competition impacts on the morphology and distribution of fine roots in European beech (*Fagus sylvatica* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *European Journal of Forest Research*, 125(1), 15-26.
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (Vol. 134). *Food & Agriculture Org.*.
- Brunner, I., & Godbold, D. L. (2007). Tree roots in a changing world. *Journal of forest research*, 12(2), 78-82.
- Burbano Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96.
- Cantú Silva, I., & Luna Robles, E. O. (2022). Reservorio de Nitrógeno y relación C: N de un Umbrisol bajo manejo forestal en Durango, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(72), 82-111.
- Casiano-Domínguez, M., Paz-Pellat, F., Rojo-Martínez, M., Covalada-Ocon, S., & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y bosques*, 24(SPE).
- Caviglia, O. P., Wingeyer, A. B., & Novelli, L. E. (2016). El rol de los suelos agrícolas frente al cambio climático. *Serie de Extensión INTA Paraná*, 78(1), 27-32.
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B., ... & Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, 20(10), 3177-3190.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2005). Programa de conservación y manejo Parque Nacional El Chico.

- Curt, T., & Prévosto, B. (2003). Root biomass and rooting profile of naturally regenerated beech in mid-elevation Scots pine woodlands. *Plant Ecology*, 167(2), 269-282.
- Dávalos, L. I. Í., Sierra, C. L. J., Ramírez, J. S., & Ortega-Rubio, A. (2014). Categorías de las áreas naturales protegidas en México y una propuesta para la evaluación de su efectividad. *Investigación y ciencia*, 22(60), 65-70.
- Djomo, A. N., Knohl, A., & Gravenhorst, G. (2011). Estimations of total ecosystem carbon pools distribution and carbon biomass current annual increment of a moist tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 261(8), 1448-1459.
- Ekoungoulou, R., Liu, X., Loumeto, J. J., & Ifo, S. A. (2014). Tree above-and below-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in secondary forest of Congo. *Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(4), 09-20.
- Finér, L., Ohashi, M., Noguchi, K., & Hirano, Y. (2011). Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 261(2), 265-277.
- Fonseca, W., Alice, F., & Rey, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 30(1), 36-47.
- Fonseca, W., Benayas, J. M. R., & Alice, F. E. (2011). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1400-1408.
- Fragoso-López, P. I., Rodríguez-Laguna, R., Otazo-Sánchez, E. M., González-Ramírez, C. A., Valdéz-Lazalde, J. R., Cortés-Blobaum, H. J., & Razo-Zárate, R. (2017). Carbon sequestration in protected areas: a case study of an *Abies religiosa* (HBK) Schlecht. et Cham Forest. *Forests*, 8(11), 429.

- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C., Hauck, J., ... & Zeng, J. (2022). Global carbon budget 2021. *Earth system science data*, 14(4), 1917-2005.
- Fu, L., Zeng, W., & Tang, S. (2017). Individual tree biomass models to estimate forest biomass for large spatial regions developed using four pine species in China. *Forest Science*, 63(3), 241-249.
- Gamarra Lezcano, C. C., Díaz Lezcano, M. I., Vera de Ortíz, M., Galeano, M. D. P., & Cabrera Cardús, A. J. N. (2018). Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 4-26.
- Gayoso, J., Guerra, J., & Schlegel, B. (2000). Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal.
- González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R. G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Cotera-Correa, M., Carrillo-Parra, A., & Marroquín-Castillo, J. J. (2013). Producción de hojarasca y retorno de nutrientes vía foliar en un matorral desértico micrófilo en el noreste de México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(2), 249-262.
- González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, RG, Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, MV, Estrada-Castillón, E., & Arévalo, JR (2018). Deposición de hojarasca y nutrientes en hojas y ramitas en diferentes comunidades vegetales del noreste de México. *Revista de Investigación Forestal*, 29 (5), 1307-1314.
- Guerra, J., Gayoso, J., Schlatter, J., & Nespolo, R. (2005). Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques: Avances en la evaluación de *Pinus radiata* en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(1), 5-21.
- Hammer, Ø., Harper, D. A., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia electronica*, 4(1), 9.

- Hernández, C. G. R., Hernández, J. M. L., Silva, I. C., Díaz, M. I. Y., Himmelsbash, W., & Rodríguez, H. G. (2022). Producción de hojarasca y depósito potencial de micronutrientes de la hojarasca en bosque de pino, encino y pino-encino, en el noreste de México: Litter production and litter nutrient deposition potential in pine, oak and pine-oak forests in northeastern Mexico. *e-CUCBA*, (19), 72-80.
- Hernández-Ramírez, V., L. López-Mata, J. A. Cruz-Rodríguez y M. Luna-Cavazos. 2022. Nicho de regeneración de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en el Monte Tláloc, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, México. *Botanical Sciences* 100 (2): 331-344.
- Herrero, C., Juez, L., Tejedor, C., Pando, V., & Bravo, F. (2014). Importance of root system in total biomass for *Eucalyptus globulus* in northern Spain. *Biomass and Bioenergy*, 67, 212-222.
- Hutchinson, I. D. (1993). *Puntos de partida y muestreo diagnóstico para la silvicultura de bosques naturales del trópico húmedo* (Vol. 204). CATIE.
- Härdle, W. K. & Simar, L. (2015) *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Cuarta Edición. Springer. London, UK.
- Ishihara, MI, Utsugi, H., Tanouchi, H., Aiba, M., Kurokawa, H., Onoda, Y., ... y Hiura, T. (2015). Eficacia de ecuaciones alométricas genéricas para estimar la biomasa: una prueba en bosques naturales japoneses. *Aplicaciones Ecológicas*, 25(5), 1433-1446.
- Krishna, MP y Mohan, M. (2017). Descomposición de hojarasca en ecosistemas forestales: una revisión. *Energía, Ecología y Medio Ambiente*, 2, 236-249.
- Krizek, D. T., Carmi, A., Mirecki, R. M., Snyder, F. W., & Bunce, J. A. (1985). Comparative effects of soil moisture stress and restricted root zone volume on morphogenetic and

- physiological responses of soybean [*Glycine max* (L.) Merr.]. *Journal of experimental botany*, 36(1), 25-38.
- Kurniatun, H., Agus, F., Velarde, S., Van Noordwijk, M., White, D., & Minang, P. (2011). Medición del carbono de los usos de la tierra. Capítulo 5. *Estimación de costos de oportunidad de REDD+*. *Manual de capacitación. Versión, 1*, 5-30.
- Lara-González, R., Sánchez-Velásquez, L. R., & Corral-Aguirre, J. (2009). Regeneración de *Abies religiosa* en claros del dosel versus sotobosque, Parque Nacional Cofre de Perote, México. *Agrociencia*, 43(7), 739-747.
- Lasota, J., Błońska, E., Łyszczarz, S., & Tibbett, M. (2020). Forest humus type governs heavy metal accumulation in specific organic matter fractions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(2), 1-13.
- Leifeld, J., & Kögel-Knabner, I. (2005). Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use?. *Geoderma*, 124(1-2), 143-155.
- Levillain, J., Thongo M'Bou, A., Deleporte, P., Saint-André, L., & Jourdan, C. (2011). Is the simple auger coring method reliable for below-ground standing biomass estimation in *Eucalyptus* forest plantations?. *Annals of Botany*, 108(1), 221-230.
- Litton, C. M., Raich, J. W., & Ryan, M. G. (2007). Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 13(10), 2089-2109.
- López-Hernández, J. M., González-Rodríguez, H., Ramírez-Lozano, R. G., Cantú-Silva, I., Gómez-Meza, M. V., Pando-Moreno, M., & Estrada-Castillón, A. E. (2013). Producción de hojarasca y retorno potencial de nutrientes en tres sitios del estado de Nuevo León, México. *Polibotánica*, (35), 41-64.

- López Hernández, J. M., González Rodríguez, H., Ramírez Lozano, R. G., del Valle Arango, J. I., Cantú Silva, I., Pando Moreno, M., ... & Gómez Meza, M. V. (2015). Producción de hojarasca y depósito potencial de nutrientes de las hojas en el Matorral Espinoso Tamaulipeco. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(30), 74-89.
- López-Reyes, L. Y., Domínguez-Domínguez, M., Martínez-Zurimendi, P., Zavala-Cruz, J., Gómez-Guerrero, A., & Posada-Cruz, S. (2016). Carbono almacenado en la biomasa aérea de plantaciones de hule (*Hevea brasiliensis Müell. Arg.*) de diferentes edades. *Madera y bosques*, 22(3), 49-60.
- Lusk, C. H., Donoso, C., Jiménez, M., Moya, C., Oyarce, G., Reinoso, R., ... & Matus, F. (2001). Descomposición de hojarasca de *Pinus radiata* y tres especies arbóreas nativas. *Revista chilena de historia natural*, 74(3), 705-710.
- Maeght, J. L., Rewald, B., & Pierret, A. (2013). How to study deep roots—and why it matters. *Frontiers in plant science*, 4, 299.
- Macklon, A. E. S., Mackie-Dawson, L. A., Sim, A., Shand, C. A., & Lilly, A. (1994). Soil P resources, plant growth and rooting characteristics in nutrient poor upland grasslands. *Plant and Soil*, 163(2), 257-266.
- Monárrez-González, J. C., Pérez-Verdín, G., López-González, C., Márquez-Linares, M. A., & González-Elizondo, M. D. S. (2018). Efecto del manejo forestal sobre algunos servicios ecosistémicos en los bosques templados de México. *Madera y bosques*, 24(2).
- Moreno Valdez, M. E., Domínguez Gómez, T. G., Alvarado, M. D. S., Colín, J. G., Corral Rivas, S., & González Rodríguez, H. (2018). Aporte y descomposición de hojarasca en bosques templados de la región de El Salto, Durango. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(47), 70-93.

- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest ecology and Management*, 257(2), 427-434.
- Nakatsubo, T., Uchida, M., Sasaki, A., Kondo, M., Yoshitake, S., & Kanda, H. (2015). Carbon accumulation rate of peatland in the High Arctic, Svalbard: Implications for carbon sequestration. *Polar Science*, 9(2), 267-275.
- Niiyama, K., Kajimoto, T., Matsuura, Y., Yamashita, T., Matsuo, N., Yashiro, Y., ... & Noor, N. S. (2010). Estimation of root biomass based on excavation of individual root systems in a primary dipterocarp forest in Pasoh Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Journal of Tropical Ecology*, 271-284.
- Ocampo, H. A. G., Cortés-Calva, P., Dávalos, L. I. Í., & Ortega-Rubio, A. (2014). Las áreas naturales protegidas de México. *Investigación y ciencia*, 22(60), 7-15.
- Oliveira, N., Rodríguez-Soalleiro, R., Pérez-Cruzado, C., Cañellas, I., Sixto, H., & Ceulemans, R. (2018). Above-and below-ground carbon accumulation and biomass allocation in poplar short rotation plantations under Mediterranean conditions. *Forest ecology and management*, 428, 57-65.
- Quinto Mosquera, H., Moreno Hurtado, F., Caicedo Moreno, H. Y., & Perez Luis, M. T. Y. (2016). Biomasa de raíces finas y fertilidad del suelo en bosques pluviales tropicales del pacífico colombiano. *Colombia Forestal*, 19(1), 53-66.
- Pavón, N. P., Moreno, C. E., & Ramírez-Bautista, A. (2012). Biomasa de raíces en un bosque templado con y sin manejo forestal en Hidalgo, México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 18(3), 304-312.

- Paz Pellat, F., Argumedo Espinoza, J., Cruz Gaistardo, C. O., Etchevers, J. D., & de Jong, B. (2016). Distribución espacial y temporal del carbono orgánico del suelo en los ecosistemas terrestres de México. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 289-310.
- Peichl, M., Leava, N. A., & Kiely, G. (2012). Above-and belowground ecosystem biomass, carbon and nitrogen allocation in recently afforested grassland and adjacent intensively managed grassland. *Plant and Soil*, 350(1), 281-296.
- Pérez-Ramírez, S., Ramírez, M. I., Jaramillo-López, P. F., & Bautista, F. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 157-173.
- Rau, B. M., Tausch, R., Reiner, A., Johnson, D. W., Chambers, J. C., Blank, R. R., & Lucchesi, A. (2010). Influence of prescribed fire on ecosystem biomass, carbon, and nitrogen in a pinyon juniper woodland. *Rangeland Ecology & Management*, 63(2), 197-202.
- Razo Zárate, R., Gordillo Martínez, A. J., Rodríguez Laguna, R., Maycotte Morales, C. C., & Acevedo Sandoval, O. A. (2015). Coeficientes de carbono para arbustos y herbáceas del bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 6(31), 58-67.
- Rewald, B., & Leuschner, C. (2009). Belowground competition in a broad-leaved temperate mixed forest: pattern analysis and experiments in a four-species stand. *European Journal of Forest Research*, 128(4), 387-398.
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, Ó. A., Treviño-Garza, E. J., & Razo-Zárate, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biósfera el Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*, 5(3), 317-327.

- Rojas-García, F., De Jong, B. H., Martínez-Zurimendí, P., & Paz-Pellat, F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of forest science*, 72(6), 835-864.
- Rodríguez-Laguna, R., Razo-Zárate, R., Fonseca-González, J., Capulín-Grande, J., & Goche-Telles, R. (2015). Regeneración natural post-incendio de *Abies religiosa* (HBK) Schl. et Cham, en el Parque Nacional “El chico” Hidalgo. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(2), 11-22.
- Ronquillo-Gorgúa, N., Razo-Zárate, R., Rodríguez-Laguna, R., Acevedo-Sandoval, OA, Hernández-Ortiz, J., & Manzur-Chávez, N. (2022). Almacenamiento de carbono en etapas de crecimiento de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. y cham. en la Sierra Alta Hidalguense. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28 (3), 483-497.
- Romahn-Hernández, L. F., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A., Monterroso-Rivas, A. I., & Pérez-Hernández, M. D. J. (2020). Rango altitudinal: factor de vigor forestal y determinante en la regeneración natural del oyamel. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 8(22).
- Russell, R. S. (1977). Plant root systems: their function and interaction with the soil. McGraw-Hill Book Company (UK) Limited.
- Rzedowski J (2006) Capítulo 17. Bosque de coníferas. In: Rzedowski J (2006) Vegetación de México. First digital edition. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Mexico, pp 295–327.
- Sáenz-Romero, C., Rehfeldt, G. E., Duval, P., & Lindig-Cisneros, R. A. (2012). *Abies religiosa* habitat prediction in climatic change scenarios and implications for monarch butterfly conservation in Mexico. *Forest Ecology and Management*, 275, 98-106.

- Saintilan, N., Rogers, K., Mazumder, D., & Woodroffe, C. (2013). Allochthonous and autochthonous contributions to carbon accumulation and carbon store in southeastern Australian coastal wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 128, 84-92.
- Schuler, J., Bragg, D. C., & McElligott, K. (2017). Biomass estimates of small diameter planted and natural-origin loblolly pines show major departures from the national biomass estimator equations. *Forest Science*, 63(3), 319-330.
- Sierra, C. A., del Valle, J. I., & Orrego, S. A. (2001). Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros tropicales de Colombia. *IUFRO World Series Vol 13*, 241.
- Smit, A. L., Bengough, A. G., Engels, C., van Noordwijk, M., Pellerin, S., & van de Geijn, S. C. (Eds.). (2013). *Root methods: a handbook*. Springer Science & Business Media.
- Smithwick, E. A., Lucash, M. S., McCormack, M. L., & Sivandran, G. (2014). Improving the representation of roots in terrestrial models. *Ecological Modelling*, 291, 193-204.
- Sochacki, S. J., Ritson, P., Brand, B., Harper, R. J., & Dell, B. (2017). Accuracy of tree root biomass sampling methodologies for carbon mitigation projects. *Ecological Engineering*, 98, 264-274.
- StatSoft, Inc. (2011). STATISTICA (data analysis software system), version 10. www.statsoft.com.
- Stockmann, U., Adams, M. A., Crawford, J. W., Field, D. J., Henakaarchchi, N., Jenkins, M., ... & Wheeler, I. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, 80-99.
- Torres-Rojo, J. M., Moreno-Sánchez, R., & Mendoza-Briseño, M. A. (2016). Sustainable forest management in Mexico. *Current Forestry Reports*, 2(2), 93-105.

- Van Noordwijk, M., & De Willigen, P. (1987). Agricultural concepts of roots: from morphogenetic to functional equilibrium between root and shoot growth. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35(4), 487-496.
- Van Pham, M., Pham, T. M., Du, Q. V. V., Bui, Q. T., Van Tran, A., Pham, H. M., & Nguyen, T. N. (2019). Integrating Sentinel-1A SAR data and GIS to estimate aboveground biomass and carbon accumulation for tropical forest types in Thuan Chau district, Vietnam. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 148-157.
- Van Ravenzwaaij, D., Cassey, P., & Brown, S. D. (2018). simple introduction to Markov Chain Monte–Carlo sampling. *Psychonomic Bulletin & Review*, 25(1): 143-154.
- Wang, C. (2006). Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 222(1-3), 9-16.
- Yepes, A., Zapata, M., Bolivar, J., Monsalve, A., Espinosa, S. M., Sierra-Correa, P. C., & Sierra, A. (2016). Ecuaciones alométricas de biomasa aérea para la estimación de los contenidos de carbono en manglares del Caribe Colombiano. *Revista de Biología Tropical*, 64(2), 913-926.
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis*. 5rd. Ed Hall P. New Jersey: Upper Saddle river. 944 p.
- Zaiets, O., & Poch, R. M. (2016). Micromorphology of organic matter and humus in Mediterranean mountain soils. *Geoderma*, 272, 83.