



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y  
CONSERVACIÓN**

**TESIS**

**BIOMASA DE RAÍCES Y CARBONO  
SUBTERRÁNEO EN BOSQUES DE NIEBLA DE  
LA SIERRA MADRE ORIENTAL, MÉXICO**

**Para obtener el grado de  
Maestra en Ciencias en Biodiversidad y  
Conservación**

**PRESENTA**

Biól. Yokebed Cruz de Jesús

**Director**

Dr. Numa P. Pavón Hernández

**Comité tutorial**

Dr. Arturo Sánchez González

Dr. Oscar Luis Briones Villarreal

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Mineral de la Reforma, Hidalgo, México., octubre 2023



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería

School of Engineering and Basic Sciences

Área Académica de Biología

Department of Biology

Mineral de la Reforma, Hgo., a 27 de octubre de 2023

Número de control: ICBI-AAB/901/2023

Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCIO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

El Comité Tutorial del nombre del producto que indique el documento curricular del programa educativo de posgrado titulado **“BIOMASA DE RAÍCES Y CARBONO SUBTERRÁNEO EN BOSQUES DE NIEBLA DE LA SIERRA MADRE ORIENTAL, MÉXICO”**, realizado por la sustentante **Yokebed Cruz De Jesús** con número de cuenta **337354** perteneciente al programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN BIODIVERSIDAD Y CONSERVACIÓN**, una vez que ha revisado, analizado y evaluado el documento recepcional de acuerdo a lo estipulado en el Artículo 110 del Reglamento de Estudios de Posgrado, tiene a bien extender la presente:

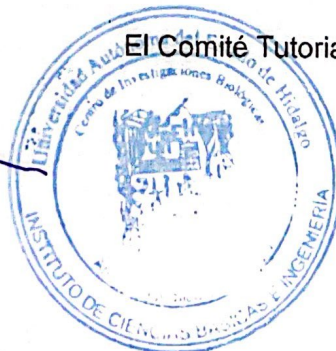
### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Por lo que el sustentante deberá cumplir los requisitos del Reglamento de Estudios de Posgrado y con lo establecido en el proceso de grado vigente.

**Atentamente**  
**“Amor, Orden y Progreso”**

El Comité Tutorial

Dr. Numa P. Pavón Hernández  
Vocal



Dr. Arturo Sánchez González  
Presidente

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna  
Secretario

Dr. Oscar Luis Briones Villarreal  
Suplente

ROP/CIAF

Ciudad del Conocimiento  
Carretera Pachuca-Tulancingo km 4.5  
Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma,  
Hidalgo, México. C.P. 42184  
Teléfono: +52 (771) 71 720 00 ext. 6640, 6642  
Fax 2112  
aab\_icbi@uaeh.edu.mx



[www.uaeh.edu.mx](http://www.uaeh.edu.mx)

## **Agradecimientos**

Agradezco a mi comité tutorial integrado por el Dr. Numa Pavón, el Dr. Oscar Briones, el Dr. Arturo Sánchez González y el Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna por sus comentarios, su disposición de enseñanza y por hacerme sentir en confianza, en particular al Dr. Numa Pavón por su apoyo y comprensión en todo momento.

A mi extranjero favorito, José Fabio Rico, por su meritorio apoyo en cada muestreo y por las múltiples consultas para la elaboración de este proyecto, además de siempre alentarme, nunca pensé que en la maestría encontraría a una persona tan maravillosa y admirable con quien compartir mi vida y el amor por la ciencia. Siempre estaré aprendiendo de ti.

A mis padres, Yolanda y Silvestre y a mi hermano Aldair, por celebrar mis logros y por su cariño aún en la distancia. Especialmente gracias a mis padres, pues sus consejos y su comprensión los caracterizan. Gracias por fomentarme el deseo de aprender y de superarme constantemente.

A Curie, mi fiel compañera gatuna, siempre reconfortándome en esas largas noches de desvelo, trabajo y desespero.

A mi mejor amiga, Beatriz, por estar conmigo en cada paso que doy, por su guía y por levantarme siempre sin importar que tan lejos estemos.

A mis amigos y colegas Omar Larios y Alexis Pardo, gracias por esas noches de café, vino y juegos. Sin ustedes la maestría no hubiera sido tan divertida y llevadera.

A mis tíos, Sonia y Antonio por brindarme un espacio en su hogar durante mi estancia en el INECOL y por esos días de “toritos”, alitas y vino. De verdad que me la pasé súper bien.

Al valioso apoyo en campo por parte de Lizbeth Perea Badillo y Pablo, gracias por el abrigo cuando estuvimos trabajando a  $-3^{\circ}\text{C}$  en Huayacocotla y por esos deliciosos tamalitos. A Aurelio por su asistencia en Tlanchinol. También, a Ángel García Vite y a Jorge Valencia Herveth por su apoyo en Xochicoatlán. Y a Mariana Baños López por su gran ayuda en el laboratorio.

Finalmente, al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca (797812) otorgada para la realización de los estudios de posgrado.

## Resumen

El cambio climático es el fenómeno más significativo a nivel mundial, debido principalmente, al aumento inmoderado del consumo de combustibles fósiles, los cuales al ser utilizados liberan gases que causan el efecto invernadero, elevando la temperatura del planeta. La estimación de la biomasa es esencial para analizar los flujos y almacenes del carbono en los ecosistemas y generar estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero. Aunque existe información sobre el contenido de biomasa y carbono (C) en los compartimentos aéreos de los ecosistemas forestales, la información sobre compartimentos subterráneos es escasa, particularmente para el bosque de niebla. Este tipo de vegetación se encuentra amenazado por actividades antropogénicas como el cambio de uso de suelo. En este trabajo se estimó la biomasa y C radicular en tres fragmentos de bosque de niebla en la región central de la Sierra Madre Oriental de México. Además, se estimó el contenido de carbono orgánico en el suelo. Así mismo, se evaluó la hipótesis de que la concentración de raíces en el bosque no es homogénea, sino que se concentran cerca del fuste de los árboles. Se extrajeron 60 muestras de suelo de 8 cm de diámetro y 30 cm de profundidad en cada fragmento. La biomasa se estimó como el peso seco de las raíces muy finas, finas y gruesas y contenido del C como el 50% del peso de la biomasa. La biomasa radicular tuvo un intervalo de 611.09 a 880.99 g m<sup>-2</sup> y el C total de 305.55 a 440.50 g C m<sup>-2</sup>. La biomasa promedio de las raíces muy finas, finas y gruesas fue 196.07 g m<sup>-2</sup>, 2.51 g m<sup>-2</sup> y 2.60 g m<sup>-2</sup>, respectivamente. El contenido de C de los fragmentos de BN estudiados fue menor al estimado para otros BN de México, con valores entre 856 y 3600 g C m<sup>-2</sup>. El C orgánico total promedio en el suelo fue de 108.24 g C m<sup>-2</sup> ± 33.21. En cuanto a la hipótesis propuesta, sólo en el fragmento de Tlanchinol había significativamente más biomasa de raíces gruesas cerca del fuste de los árboles, por lo cual no es posible apoyar la hipótesis. La variación en los reservorios de C en el bosque de niebla en México, probablemente se deben a las diferencias en las condiciones edáficas y la estructura y composición florística. Los bosques de niebla de la zona centro de la Sierra Madre Oriental tiene un alto potencial de almacenar carbono subterráneo, similar o mayor a otros ecosistemas forestales.

Palabras clave: bosque mesófilo de montaña, ciclo del carbono; mitigación al cambio climático; productividad primaria subterránea; secuestro de carbono.

## Índice

<b>I. Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>II. Antecedentes</b> .....	<b>3</b>
<b>III. Justificación</b> .....	<b>7</b>
<b>IV. Objetivos</b> .....	<b>8</b>
IV.1. Objetivo general .....	8
IV.2. Objetivos específicos.....	8
<b>V. Hipótesis</b> .....	<b>9</b>
<b>VI. Materiales y métodos</b> .....	<b>9</b>
VI.1. Zona de estudio .....	9
VI.2. Sitios de muestreo. ....	10
VI.3. Muestreo en campo .....	14
VI.4. Trabajo de laboratorio .....	15
VI.5. Análisis estadístico .....	16
<b>VII. Resultados</b> .....	<b>17</b>
VII.1. Caracterización ambiental de los sitios .....	17
VII.2. Biomasa de raíces y estimación de carbono.....	18
VII.3. Correlaciones entre la biomasa, el Diámetro a la Altura del Pecho y la cobertura	22
VII. 4. Contenido de carbono en suelo .....	22
<b>VIII. Discusión</b> .....	<b>23</b>
VIII.1. Biomasa subterránea de raíces.....	23
VIII.2. Almacenamiento de carbono .....	25
VIII.3. Características de los sitios (Propiedades de los suelos) .....	27
VIII.4. Biomasa cerca y lejos del fuste.....	29
VIII.5. Características de la vegetación (biomasa, diámetro a la altura del pecho y cobertura del dosel) .....	30
<b>IX. Conclusiones</b> .....	<b>32</b>
<b>X. Literatura citada</b> .....	<b>34</b>
<b>Anexo 1.</b> .....	<b>49</b>

## **I. Introducción**

La biomasa de raíces representa gran parte de la materia orgánica y carbono (C) subterráneos de los ecosistemas terrestres y son parte medular para los flujos de C en el suelo (Brown, 1997; Campbell & de Jong, 2001; Jiménez Rodríguez, & Arias Aguilar, 2004). Las raíces son responsables de al menos 50% de la respiración del suelo y, en consecuencia, de 25 a 60% de la productividad primaria bruta total de los asimilados de carbono transportados bajo tierra (Högberg et al., 2002; Litton et al., 2007).

Conjuntamente, el sistema radicular posee raíces gruesas que cumplen con funciones de sostén estructural, y raíces finas para la absorción de agua, y para la extracción y reserva de nutrientes (Makita et al., 2012; Morales, 1997). Las raíces finas tienen diámetros menores de 5 mm (Jackson et al., 1997; MacDicken, 1997; Pavón et al., 2012), en comparación con las raíces gruesas que son mayores a 5 mm, aunque la definición por su diámetro varía entre los autores (Brassard et al., 2011; Pavón et al., 2012). Las raíces finas demandan mayor atención puesto que, además presentan asociaciones simbióticas (micorrizas) y la incorporación de nutrientes (Litton et al., 2007). Al mismo tiempo, se consideran como un sumidero preponderante del carbono adquirido en la productividad primaria neta terrestre (Addo-Danso et al., 2016).

De acuerdo con Covington y colaboradores (1997), una buena producción en el sistema de raíces genera una mejor conservación de los ecosistemas forestales, denotando así, la importancia de la biomasa subterránea como un indicador de calidad ambiental. De igual forma, es importante destacar que la sostenibilidad de los ecosistemas forestales y su conservación se relaciona con la funcionalidad de suelo. La productividad primaria neta subterránea es la base para la interacción entre minerales, organismos y plantas, donde los exudados de las raíces agregan C al suelo y promueven los procesos de descomposición (Prado et al., 2016; Sutil de Oliveira- Pessoa Paes et al., 2018; Tisdall & Oades, 1982).

Cerca del 90% de la biomasa acumulada en la tierra se encuentra en los bosques en forma de fustes, ramas, hojas, raíces y materia orgánica. En general, los bosques son los ecosistemas terrestres con mayor capacidad para secuestrar C a través de la fotosíntesis, la vegetación forestal absorbe dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que es fijado en biomasa (Graciano-Ávila et al.,

2019). Los bosques absorben cerca de 110 Gt C año<sup>-1</sup>, por respiración emiten 55 Gt C año<sup>-1</sup> y por descomposición de 54 a 55 Gt·C año<sup>-1</sup> (Marek & Rattan, 2005). Por otro lado, el C del suelo, el detritus y la turba almacenan hasta 172 Gt·C (Bolin et al., 1986).

En particular los bosques de niebla (BN) han sido relativamente poco estudiados en cuanto a sus almacenes de C y la mayoría de las estimaciones se han realizado en el componente aéreo (John et al., 2001), con valores que oscilan de 82.92 a 414.53 Mg ha<sup>-1</sup> (Álvarez-Arteaga et al., 2013; Rodríguez-Laguna et al., 2009). Respecto a los almacenes subterráneos de C las estimaciones son de 8.56 hasta 36 Mg ha<sup>-1</sup> (Avilés-Hernández et al., 2009; De Jong et al., 1999). En México el BN cubre 0.8% de su territorio con vegetación primaria (INEGI, 2016), se encuentra en altitudes bajas, medias y altas, que varían entre 500 y 3000 m s.n.m. con alta condensación, lluvias abundantes, humedad y niebla durante gran parte del año (Williams-Linera, 2012).

La mayor extensión de bosque se encuentra en Oaxaca y la Sierra Madre del Sur de Guerrero (Ochoa-Ochoa et al., 2017). Sin embargo, en la zona centro-este de México sobre las estribaciones de la Sierra Madre Oriental los fragmentos de bosque de niebla son de los mejores conservados del país (Gerez-Fernández, 2013). La disminución del área del BN continua por la deforestación debida al cambio de uso de suelo (García-de la Cruz et al., 2014). Los procesos de cambio de uso de suelo junto con otras actividades humanas provocan la alta emisión de CO<sub>2</sub> causando efecto invernadero y el subsecuente calentamiento global (Acosta Mireles et al., 2011; Adedeji et al., 2014).

En los BN hay pocas estimaciones de contenido de C en los diferentes almacenes; particularmente, se tiene pocos datos de los almacenes de C subterráneo. Esto a pesar de la importancia que tiene, ya que a nivel global se considera que una cuarta parte del C total se almacena en este compartimento (Ma et al., 2021). De modo que es importante complementar las estimaciones de biomasa de los ecosistemas forestales con información de la parte subterránea para estimar el potencial de almacenamiento de C en los BN. Pues, a mayor captura de C, mayor será la contribución de la reducción en la concentración de los gases de efecto invernadero de la atmósfera, y, por lo tanto, mayor impacto en mitigar el cambio climático.

Con base en la información anterior, en este trabajo se estimó la biomasa de raíces y el contenido de C de los depósitos subterráneos en el BN de la región centro-este de la Sierra Madre Oriental (SMO), para determinar el potencial de captura y almacenamiento de C. La biomasa de raíces puede variar de acuerdo diversas condiciones fenológicas, que pueden definir la disponibilidad de nutrientes, distribución, diámetro y crecimiento (Finér et al., 2011). También depende de las distancias en donde se toma la muestra, es decir, desde la base del tallo de los árboles hasta una muestra más lejana del mismo (Raizada et al., 2013), además de condiciones ambientales de los sitios, en particular las propiedades físico-químicas del suelo. Es relevante conocer la distribución del sistema de raíces de diferentes diámetros y a distancias crecientes desde el tallo del árbol y con ello, conseguir mayor información acerca de la distribución de nutrientes disponibles dentro de un ecosistema y así conducir a una mejor gestión de los sistemas forestales (Karki et al., 2021; Vitousek & Sanford, 1986). En este trabajo se evaluó la hipótesis sobre la distribución horizontal de las raíces en el piso del bosque considerando que la mayor proporción de raíces se encuentra cerca de los fustes de los árboles. Además, se relacionó la biomasa de raíces con la cobertura y el diámetro del tallo de los árboles para evaluar si hay un efecto de la estructura del bosque sobre la biomasa subterránea.

## **II. Antecedentes**

Las raíces, como componentes subterráneos de los árboles, son el soporte de todo el crecimiento aéreo y desempeñan un rol vital en el abastecimiento y almacenamiento de agua y nutrientes (Karizuma, 1974). No obstante, la biomasa de raíces de especies forestales de BN ha sido poco estudiada, seguramente por la dificultad y lo costoso de la extracción de los sistemas radiculares completos (Cairns et al., 1997; Santantonio et al., 1977). En consecuencia, existe la carencia de datos disponibles que definen la magnitud y dinámica de los ciclos biogeoquímicos asociados a las raíces en muchos ecosistemas forestales (Gárate & Blanco, 2013).

En México, pese a los escasos de información sobre el contenido de C y biomasa, se reconoce a los BN con una elevada capacidad de almacenamiento de C en biomasa total. En el estado



de Chiapas, por ejemplo, De Jong y colaboradores (1999) ubicaron en  $468 \text{ Mg C ha}^{-1}$  el almacén total de C para algunos bosques de encino y un BN, del cual  $36 \text{ Mg ha}^{-1}$  es biomasa de raíces. Para bosques montanos de Veracruz, Gómez-Díaz (2008) determinó un almacén total de  $230.8 \text{ Mg C ha}^{-1}$  del cual, para raíces fue de  $17.8 \text{ Mg ha}^{-1}$ , por otra parte, Etchevers et al. (2001) reportan un total  $255 \text{ Mg ha}^{-1}$  en un bosque de liquidámbar (un tipo de BN); sin embargo,  $152 \text{ Mg C ha}^{-1}$  corresponden a carbono en suelo y  $3.32 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a raíces. Las estimaciones para raíces sin inferiores, sin embargo, el sistema radicular como almacén de C llega a representar entre 10 y 40% de la biomasa total, y es quizá, el almacén más complejo de evaluar debido a la alta variabilidad con que se desarrolla el sistema radicular de las plantas (Cairns et al., 1997).

Algunos autores como Meave (2006) y Álvarez-Arteaga (2010), indican que las diferencias en la cantidad de biomasa se relacionan con la estructura y composición florística de las comunidades vegetales, además del gradiente altitudinal. Por ejemplo, Álvarez-Arteaga y colaboradores (2013), reportaron que el contenido de biomasa en raíces finas en los primeros 30 cm de profundidad fue mayor a 1950 y 2400 m s.n.m. (entre  $12$  y  $19 \text{ Mg ha}^{-1}$ ) y menor para las de 1500 y 2500 m s.n.m. ( $4.2 \text{ Mg ha}^{-1}$ ). Para los almacenes de C en suelo, fueron  $220 \text{ Mg C ha}^{-1}$  en altitudes de 1500 m, y, para altitudes 2400 m en adelante, declinaron hasta los  $158 \text{ Mg C ha}^{-1}$ . El suelo juega un papel importante en el reciclaje y almacenaje de C mediante los procesos de desnitrificación y descomposición de la materia orgánica, pues tiene una gran capacidad para secuestrar C acumulándolo por miles de años (Breymer et al., 1996).

En 2009 Acosta-Mireles y colaboradores determinaron el contenido de carbono en un bosque de *Pinus patula*, y mencionan que la mayor cantidad de C se concentró en la parte subterránea, principalmente en los primeros 20 cm; con la cantidad de carbono total de  $212 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Adicionalmente, la información del contenido de carbono y biomasa se ha establecido para comparativos en el sector agrícola y forestal con respecto al bosque de niebla. Por ejemplo, Masuhara y colaboradores (2015), determinaron el C almacenado en estrato aéreo y en el suelo de sistemas de uso de la tierra en Huatusco, Veracruz, en donde el mayor contenido de C total fue en el BN con  $481 \text{ Mg ha}^{-1}$ . De este total,  $48.15 \text{ Mg ha}^{-1}$  pertenece al carbono almacenado en raíces, es decir, un 10%. Los autores indican que la razón por la cual existe más C almacenado en BN puede deberse a la mayor densidad de árboles y a una mayor

diversidad de especies. Estos datos dan un indicio de la importancia de la fijación de carbono, pues participan en el mejoramiento de la calidad del ambiente como mecanismo de mitigación del efecto de invernadero (Jiménez Rodríguez, & Arias Aguilar, 2004).

Otros estudios en el BN, en Costa Rica, arrojaron que, la biomasa total de raíces subterráneas en el suelo, varió dependiendo la posición o el grado de inclinación de la pendiente, es decir, la estimación fue de 1600 g m<sup>-2</sup> (zona con pendiente) a 7200 g m<sup>-2</sup> (en la parte no inclinada). Particularmente, para el caso de las raíces finas (<2mm de diámetro), varió de 300 g m<sup>-2</sup> (con pendiente) a 1300 g m<sup>-2</sup> (sin pendiente). La biomasa de raíces finas comprendió un 20 y un 40% de la biomasa total de raíces subterráneas (Vance & Nadkarni, 1992).

Continuando con las investigaciones en el sur del continente americano, se estudió la densidad de árboles, el área basal, la distribución vertical (0-25 cm) de raíces (<2 mm y <5 mm) y su biomasa en un bosque montano de sucesión de 10 y 20 años y en un bosque montano maduro en La Planada, Colombia. En cada uno de los tres bosques se presentó una reducción exponencial en la biomasa de las raíces conforme iba incrementando la profundidad. La biomasa de raíces de menos de 5 mm de diámetro en los primeros 10 cm del suelo (medida con barrenos cilíndricos y en terreno plano) no fue significativamente diferente entre los tres estadios de sucesión (3.46, 3.71 y 4.00 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Además, los cambios en la micro topografía del suelo representan un recurso importante para el crecimiento de las raíces y la estructura de los bosques de niebla (Cavelier et al., 1996).

El término bosque de niebla también es definido como bosque mesófilo de montaña, bosque montano de niebla, selva nublada; o bien en otros idiomas como: *cloud forest*, *montane cloud forest*, *forêt dense humide de montagne*, *moist montane forest* (Gual-Díaz & Rendón-Correa, 2014; Rzedowski, 2006). Recientemente, se le ha denominado como *tropical mountain cloud forest*. En parte es por esto que es difícil encontrar información sobre biomasa y carbono en bosques de niebla debido a las sinonimias existentes por la complejidad y heterogeneidad de sus asociaciones. Así pues, “los bosques de niebla encabezan la lista de los ecosistemas más afectados a nivel mundial y se considera que los remanentes de estos sistemas están confinados en pequeñas áreas sumamente fragmentadas” (Álvarez-Arteaga et al., 2014). El cambio de uso del suelo en los bosques de niebla ha sido promovido principalmente, por la deforestación y la lenta pérdida de la biomasa (degradación), y, en consecuencia, ha dado pie

a transformaciones abruptas en las condiciones naturales de los bosques nublados, así como su capacidad para proveer servicios ecosistémicos, tales como servicios hidrológicos, la biodiversidad y la captura de CO<sub>2</sub> (Asbjornsen & Manson, 2015; Vizcaíno-Bravo, 2017).

El BN contiene unas 2822 especies de plantas nativas (Villaseñor, 2010) representando un 12% de todas las especies vegetales estimadas para México (23 314 especies) (Villaseñor, 2016), lo que hace que este bosque sea el más diverso en México con relación a la superficie que ocupa (Gual-Díaz & Rendón-Correa, 2014).

De las 2500 especies de plantas se han catalogado 650 géneros agrupados en cerca de 144 familias, en donde las dicotiledóneas son las mejor representadas, con 1300 especies aproximadamente, seguidas por monocotiledóneas con 700 especies, pteridofitas con 500 y gimnospermas con diez especies. En el sotobosque prevalecen pteridofitas como: *Adiantum*, *Asplenium*, *Polypodium*, *Polystichum*, *Pteridium* y *Pteris*, entre otros. Entre las epífitas destacan las orquídeas, bromelias y varias especies del género *Peperomia*; muchas se integran con los musgos para formar gruesas capas sobre troncos, ramas y hojas de árboles y arbustos, con líquenes y helechos (Williams-Linera, 2012).

En relación con géneros de árboles cuantitativamente importantes en el bosque de niebla, se enlista a: *Alfaroa*, *Alnus*, *Carpinus*, *Carya*, *Chiranthodendron*, *Cinnamomum*, *Clethra*, *Cleyera*, *Cornus*, *Dalbergia*, *Dendropanax*, *Fraxinus*, *Juglans*, *Liquidambar*, *Matudaea*, *Meliosma*, *Nyssa*, *Oecopetalum*, *Oreomunnea*, *Oreopanax*, *Persea*, *Prunus*, *Quercus*, *Styrax*, *Symplocos*, *Ternstroemia* y *Zinowiewia*. Prevalecen aquellos de afinidad geográfica meridional, sobre los boreales, y solamente 2% restringe su distribución a los límites del país (Rzedowski, 1996). Por otro lado, de acuerdo con Ern (1973), también se puede encontrar grandes afinidades de vegetación clímax de pinos, dominados por *Pinus leiophylla*, *P. teocote*, *P. rudis*, *P. oaxacana*, *P. montezumae*, *P. hartwegii*, *P. patula*, *P. tenuifolia* y *P. pseudostrobus*, viven en colindancia con el bosque de niebla, dado que sus requerimientos ecológicos son aparentemente similares.

La distribución del bosque de niebla corre a lo largo de las laderas de barlovento de la Sierra Madre Oriental, llega hasta el centro del estado de Veracruz y, de ahí, hasta las sierras del N y NE del estado de Oaxaca. Para la vertiente pacífica del país, su distribución es dispersa en

la Sierra Madre Occidental (desde el estado de Sinaloa) hasta la Sierra Madre del Sur y en el Eje Neovolcánico Transversal (salvo las áreas continuas que se conocen en los estados de Guerrero y Oaxaca (Gual-Díaz & Rendón-Correa, 2014; INEGI, 2007; Rzedowski, 1996).

Dada su gran riqueza florística, el bosque de niebla se encuentra dentro de los ecosistemas de mayor acumulación de C por unidad de superficie en el país (Álvarez-Arteaga et al., 2013), pues la biomasa de raíces finas aumenta al mismo tiempo que aumenta la diversidad de especies de árboles en los bosques (C. Liu et al., 2014). Esto se evidencia aún más por la correlación positiva entre la producción de raíces finas, la mortalidad y las concentraciones de carbono orgánico en el suelo (Sánchez-Silva et al., 2022).

### **III. Justificación**

Si bien en México se han realizado diversos estudios que contemplan la estimación de volumen, biomasa y captura de carbono (Graciano-Ávila et al., 2019), en los bosques de niebla la información al respecto es escasa (Segura-Castruita et al., 2005).

Los BN representan uno de los ecosistemas terrestres más amenazados por las actividades humanas, por la deforestación o el uso de suelo para la agricultura, generando tanto pérdida de biodiversidad como de servicios ecosistémicos. En particular la captura de C es un servicio ecosistémico muy importante en la mitigación de gases de efecto invernadero. Los bosques forman parte del sistema climático global, es decir que no solo fungen como almacenamiento de C, sino que son actores principales en la transferencia y flujo de energía, así como en el contenido de humedad de la atmósfera de manera que afectan a las precipitaciones, que afectan a los patrones de circulación global.

Al ser ecosistemas vulnerables, es sustancial dar a conocer el papel de los BN en la absorción del dióxido de carbono de la atmósfera. Especialmente en la parte subterránea, puesto que su contribución a la biomasa total oscila alrededor de 24 %, es decir, que al menos una cuarta parte del carbono total se almacena en este sistema (Ma et al., 2021). Es por ello, que es importante complementar las estimaciones de biomasa de los ecosistemas forestales con la información de la parte subterránea para conocer el potencial de captura total de C y obtener una estimación completa. Dicho esto, al no tener el valor de los depósitos subterráneos, no se

tiene una estimación completa de la emisión de carbono por deforestación, ya que cuando esta se produce, no solo se aporta carbono a la atmósfera, sino que también se alteran los patrones de precipitación y se incrementan las temperaturas locales, de manera que, los bosques son vulnerables a los incendios y a las condiciones más cálidas y secas que conlleva el cambio climático. Es importante conservar y darle la relevancia a los BN, pues a mayor captura de C mayor será la contribución de reducción en la concentración de los gases de efecto invernadero de la atmósfera, y, por lo tanto, un mayor impacto en la mitigación del cambio climático.

## **IV. Objetivos**

### IV.1. Objetivo general

Estimar la biomasa y contenido de carbono subterráneo del bosque de niebla en la región centro-este de la Sierra Madre Oriental, para complementar los valores de C almacenado en esta vegetación y determinar su potencial en estrategias de mitigación al cambio climático.

### IV.2. Objetivos específicos

- Comparar la proporción de raíces muy finas (MF), finas (F) y gruesas (G) en tres fragmentos de BN.
- Medir el contenido de carbono orgánico en suelo en tres fragmentos de BN.
- Evaluar la relación entre el contenido de carbono y la cantidad de biomasa subterránea.
- Analizar la composición de la biomasa subterránea en relación con las características de la vegetación (diámetro a la altura del pecho y el porcentaje de cobertura del dosel) en cada fragmento de BN.
- Evaluar el efecto de la proximidad del fuste de los árboles sobre la biomasa de raíces en el BN.

## **V. Hipótesis**

Habrá mayor proporción de raíces cerca de los troncos de los árboles. Lo anterior, bajo el supuesto de que la distribución horizontal de raíces (en especial las raíces gruesas) se concentran más cerca del fuste. Esto con base en el soporte estructural y por una mejor disponibilidad de nutrientes, por lo cual la cantidad de biomasa deferir  si se toma a distintas distancias respecto al fuste de los árboles (Ares & Peinemann, 1992; Dhyanı & Tripathi, 2000; Fin r et al., 2011; Gómez et al., 2021).

Habrá mayor biomasa de raíces en los fragmentos con mayor cobertura del dosel y árboles más grandes en cuanto al diámetro a la altura del pecho (DAP). Lo anterior, bajo el supuesto de que los bosques mejor conservados tendrán mayor cobertura y árboles más grandes, lo que genera mejores condiciones de humedad y nutrientes del suelo que favorezcan la productividad subterránea (Belsky, 1994; Millikin & Bledsoe, 1999).

## **VI. Materiales y métodos**

### VI.1. Zona de estudio

El  rea de estudio se encuentra en la zona centro de la Sierra Madre Oriental. En general el clima dominante es tipo Cf (templado húmedo con lluvias todo el año, con abundancia en verano) (Rzedowski, 2006). La precipitación total anual varía entre 1500 y 2385 mm, mientras que la temperatura media anual es de 17.1 C, en un intervalo altitudinal de 730 a 2500 m snm (Ruiz-Jiménez et al., 2012). En relación con la topografía, posee áreas muy variadas con relieves accidentados o abruptos, además de contar con laderas de pendientes bastante pronunciadas de hasta 45  (Gual-Díaz & Rendón-Correa, 2014).

En el área de estudio se mantienen fragmentos de bosque de niebla, de forma y tamaño variable (Figura 1). Dentro de estos fragmentos se manifiesta una alta heterogeneidad tanto estructural como florística con elementos holárticos y tropicales (González-Espinosa et al., 2012; Miranda & Sharp, 1950). Entre los elementos arbóreos representativos del bosque de niebla se encuentran aquellos de 15-35 m de altura, tales como liquidámbar (*Liquidambar*), varias especies de encinos (*Quercus*), los olmos (*Ulmus*), pinos (*Pinus*), además especies de

géneros como *Clethra*, *Carpinus*, *Magnolia*, *Sauravia*, *Podocarpus* (Badillo-Saldaña et al., 2016; Ruiz-Jiménez et al., 2012). En el estrato inferior prevalecen individuos de helechos arborescentes (*Cyathea*), bromelias (*Tillandsia*), orquídeas, musgos y líquenes, sobre los troncos y ramas de los árboles (Ruiz-Jiménez et al., 2012; Rzedowski, 2006).

#### VI.2. Sitios de muestreo.

Se seleccionaron tres fragmentos representativos del bosque de niebla, dentro de los municipios de Tlanchinol y Xochicoatlán en el estado de Hidalgo y Huayacocotla en el estado de Veracruz (Figura 1,2; Tabla 1). La composición florística en cuanto al estrato arbóreo fue similar. La cobertura del dosel presentó valores similares en los tres sitios. El intervalo altitudinal fue de 1620 a 1876 m snm (Tabla 1).

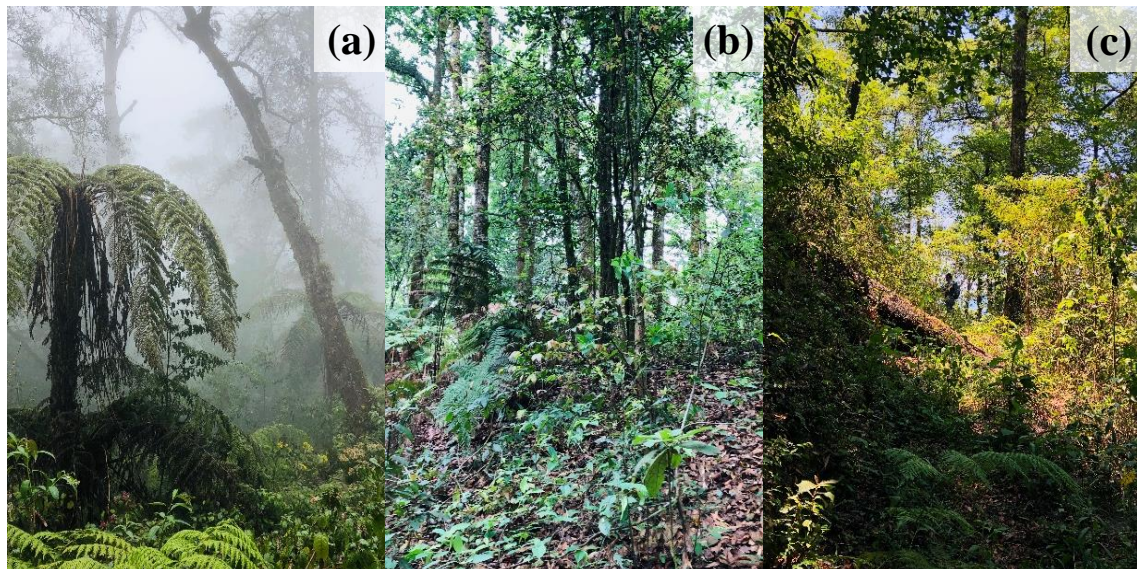


Figura 1. Sitios de muestreo en los fragmentos de bosque de niebla: a) Huayacocotla; b) Tlanchinol; c) Xochicoatlán.

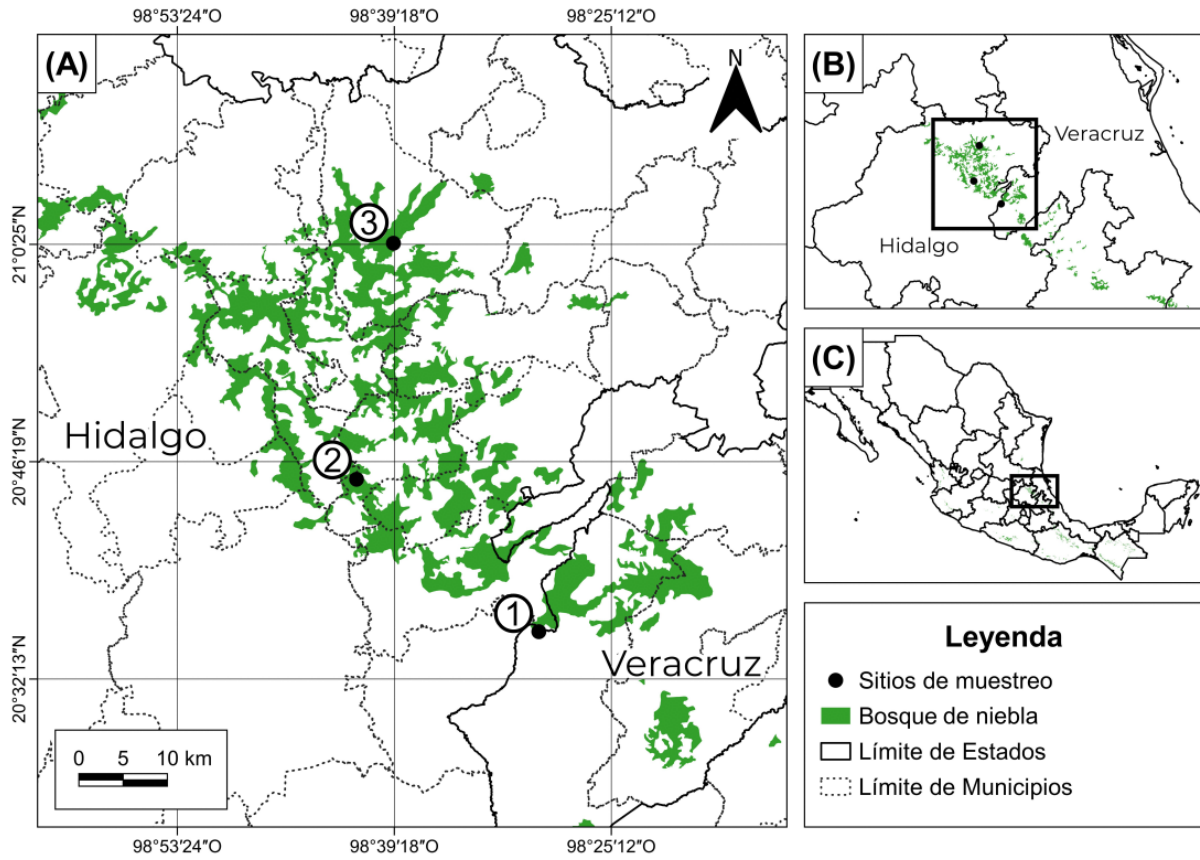


Figura 2. Zona de estudio con bosque de niebla y los sitios de muestreo. 1) Huayacocotla. 2) Xochicoatlán. 3) Tlachinol.



Tabla 1. Características de los fragmentos de bosque de niebla.

Fragmento	Clima	Composición arbórea dominante	Temperatura	Altitud (m s.n.m.)	Coordenadas
Huayacocotla	Clima templado (Cf) con lluvias todo el año	<i>Arbutus</i> sp., <i>Clethra mexicana</i> , <i>Fagus grandifolia</i> subsp. <i>mexicana</i> , <i>Liquidambar straciflua</i> , <i>Magnolia vovidesii</i> , <i>Quercus xalapensis</i> , <i>Quercus</i> sp.	10°C	1876	20°35'12''N, 98°30'13''W
Tlanchinol	Clima templado (Cwb) con lluvias en verano e inviernos secos	<i>Arbutus</i> sp., <i>Clethra mexicana</i> , <i>Liquidambar straciflua</i> , <i>Quercus xalapensis</i> , <i>Quercus</i> sp.	18°C	1629	21°00'29.57''N, 98°39'21.45''W
Xochicoatlán	Clima templado (Cw) húmedo con lluvias en verano.	<i>Clethra mexicana</i> , <i>Liquidambar straciflua</i> , <i>Quercus xalapensis</i> , <i>Quercus</i> sp., <i>Pinus</i> sp.	19°C	1620	20°45'10.64''N, 98°41'45.26''W

El fragmento de bosque de Tlanchinol, se encuentra en el municipio del mismo nombre (Figura 1 y 2). Se ubica en la parte norte del estado de Hidalgo en un intervalo altitudinal que va de los 260 y los 1800 m (Aguilar-López et al., 2013). El clima en las zonas altas es templado húmedo con lluvias todo el año C(fm) b(i') gw". La temperatura media anual es de 12 y 18°C, con una precipitación media anual de 2156.2 mm, con lluvias todo el año; el mes más húmedo es septiembre y el más seco es febrero (Pavón & Meza-Sánchez, 2009).

Los suelos son arcillosos con una capa de materia orgánica en forma de humus color oscuro (Aguilar-López et al., 2013; Luna-Vega et al., 1994). Se identifica por ser un bosque denso con distintos tamaños de especies arbóreas, entre los que están *Liquidambar macrophylla*, *Magnolia schiedeana*, *Pinus reichei*, *Alnus acuminata*, *Befaria laevis*, *Carpinus caroliniana*, *Clethra macrophyllas*, *Ostrya virginiana*, *Quercus germana*, *Beilschmiedia mexicana*, *Clethra mexicana*, *Cornus disciflora*, *Ilex toluhana*, *Microtropis schiedeana*, *Pricamnia xalapensis*, *Prunus brachybotrya* (Luna-Vega et al., 1994), por citar algunos ejemplos.

El fragmento Huayacocotla está ubicado en el municipio del mismo nombre en el estado de Veracruz (Figura 1 y 2), presenta un micro relieve accidentado con laderas de pendiente pronunciada hasta de 80° (Vargas-Ajuria, 1982). Se ubica en una altitud que va desde los 500 hasta los 2800 m s.n.m. (INEGI, 2009). Su clima es templado con abundantes lluvias en verano y templado húmedo con lluvias todo el año (Hernández-Velázquez, 2016). La temperatura promedio es de 13.9°C, con un rango que va de los 12° C a los 22° C. El rango de precipitación va de 500-2600 mm, es más abundante durante los meses de junio a septiembre (Plan Municipal de Desarrollo Huayacocotla, Veracruz, 2018).

Juárez-Medina (2008) y Hernández-Velázquez (2016), indican que en el BN las poblaciones se encuentran distribuidas con mayor homogeneidad, sobre todo las que corresponden a los géneros *Carpinus*, *Liquidámbar*, *Magnolia*, *Ostrya*, *Quercus* y *Ulmus*. En las regiones menos húmedas se desarrolla el bosque de pino-encino.

Se encuentran especies de cicadas como *Ceratozamia mexicana*, así como la familia Fagaceae y Podocarpaceae, esta última representada por *Podocarpus reichei*; los géneros *Quercus*, *Gaultheria* y *Miconia* se encuentran bien representados al igual que la familia Ericaceae

(Juárez-Medina, 2008). En menor grado sobresalen las familias Rosaceae, Rubiaceae, Solanaceae y Asteraceae (Vargas-Ajuria, 1982).

El fragmento Xochicoatlán ubicado en el municipio del mismo nombre (Figura 1 y 2), en donde dominan las sierras y se localizan la mayoría de los sistemas de laderas tendidas (INEGI, 1992). Existe una variación altitudinal de 1405 a 2200 m s.n.m. y se encuentra dentro de la región hidrológica Río Pánuco, en la cuenca del Río Moctezuma (INEGI, 1992; Mayorga-Saucedo et al., 1998). Presenta un clima templado húmedo con lluvias en verano y una precipitación pluvial media anual de 1500 a 2000 mm.

Los suelos tienen textura arenosa con una capa muy rica de hojarasca y gran cantidad de materia orgánica, por lo cual, suelen ser de color oscuro (López-Juárez, 1982; Mayorga-Saucedo et al., 1998). Se encuentran diversas formas arbustivas y herbáceas. En el estrato alto predominan *Liquidambar macrophylla* y *Quercus affinis*. Estas especies se mezclan con otras especies de encinos, principalmente *Quercus eugeniifolia* y *Q. sartorii*, así como con *Pinus patula* y *P. gregii*. Es común observar *Carpinus caroliniana*, *Ostrya virginiana*, *Carya ovata*, *Befaria laevis*, *Clethra mexicana*, *Nyssa sylvatica* y *Pinus oocarpa*. Así mismo, son comunes *Turpinia occidentalis* y *Perrottetia ovata* junto con *Microtropis schideana*, *Rondeletia capitellata*, *Oreopanax xalapensis* y *Solanum aligerum* (Mayorga-Saucedo et al., 1998).

### VI.3. Muestreo en campo

El primer muestreo se realizó en febrero de 2022, en el fragmento Huayacocotla, en el ejido “La Selva”. El segundo muestreo fue en abril de 2022, en el fragmento Tlanchinol. El tercer muestreo fue en mayo de 2022, en el fragmento Xochicoatlán (Figura 2).

Los muestreos se realizaron tomando en cuenta el método empleado por Berish (1982), el cual fue modificado debido a las características de cada fragmento de bosque. Al interior de cada fragmento se estableció un transecto de aproximadamente 360 m, orientado noreste-suroeste, con una separación de 12 m entre cada punto de muestreo, con un total de 30 puntos.

Estos se ubicaron a dos distancias distintas de forma alternada: “cerca de un árbol” (distancia máxima de 1.5 m a partir del tronco) y “lejos de un árbol” (distancia mínima de 1.60 m y máxima de 3 m a partir del tronco). La ubicación del sitio de muestreo (cerca de un árbol y lejos de un árbol), se consideró debido a que la cantidad biomasa subterránea puede diferir significativamente por la distancia que existe entre la toma de muestra cerca del fuste del árbol y el punto donde se toma la muestra de suelo (Ares & Peinemann, 1992). También, Dhyani y Tripathi (2000), utilizaron distancias diferentes (50, 100 y 150 cm) en los muestreos y encontraron mayor cantidad de biomasa de raíces cerca de los árboles que lejos de ellos. En cada punto se estableció una unidad de muestreo con un diámetro de 2 m, se extrajeron dos muestras de suelo con raíces, obteniendo así un total de 60 muestras por cada fragmento. La extracción de cada muestra se realizó con un nucleador de 8 cm de diámetro y 30 cm de profundidad. Cada muestra se colocó cuidadosamente en una bolsa plástica rotulada. Posteriormente, las muestras fueron transportadas al laboratorio en donde se procedió a la extracción, lavado, secado y pesado de las raíces para la estimación de su biomasa.

Se midió el diámetro del árbol cercano a la toma de muestra y se evaluó la cobertura del dosel con un densiómetro esférico cóncavo.

#### VI.4. Trabajo de laboratorio

De acuerdo con la metodología empleada por Pavón et al. (2012), cada muestra de suelo fue cernida para deshacer grumos y eliminar hojas, madera y fauna. Cada muestra fue tamizada en cernidores de malla metálica. Las raíces se separaron de forma manual (Pavón, 2005; Vogt et al., 1998) y se lavaron para descartar residuos de tierra, posteriormente se secaron en una estufa (LAB-LINE, modelo 3513) a 75° C durante un día. Consecutivamente, éstas se clasificaron con base en su diámetro, como raíces muy finas (<1mm), finas (1-3 mm) y gruesas (> 3 mm). Las medidas del diámetro de las raíces se realizaron con ayuda de un vernier. Finalmente, la biomasa seca de las raíces se pesó en una balanza de 0.01 g de precisión (OHAUS, modelo CT 200) (Newbold, 1968).

Las muestras de suelo cernidas fueron guardadas en bolsas de papel para que no retuvieran humedad. Después, fueron separadas de acuerdo con su ubicación en “cerca” y “lejos” por

cada fragmento. Se realizaron cuatro muestras compuestas por cada fragmento, de las cuales dos fueron para ubicación “cerca” (1), dos para ubicación “lejos” (2), dando un total de 12 muestras compuestas. Lo anterior se realizó de acuerdo con lo establecido en el manual para muestras de suelo del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-INTA (2012). Posteriormente, se enviaron al Laboratorio Central Universitario de la Universidad Autónoma de Chapingo para el análisis de conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), pH y textura.

El carbono orgánico en el suelo ( $\text{Mg C ha}^{-1}$ ) se estimó usando la siguiente ecuación:  $\text{COS} = \text{DA} * \text{C} * \text{Pr}$ . Donde DA es la densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ), C es el carbono orgánico del suelo (%) y Pr es la profundidad del suelo (cm) (González-Molina et al., 2008). Esta fórmula se aplicó para cada fragmento y se determinó el promedio y la desviación estándar. Para estimar la densidad aparente (DA), se utilizó la fórmula propuesta por Adams (1973):

$$DA = \frac{100}{\frac{MO}{k_1} + \frac{(100-MO)}{k_2}}, \text{ en donde las constantes } k_1 (0.1555) \text{ y } k_2 (1.6268) \text{ son promedio de una}$$

compilación de valores de estas constantes de la relación de Adams citada en Paz-Pellat & Velázquez-Rodríguez (2018). En cuanto al porcentaje de Carbono, se estimó a partir de la siguiente fórmula:  $\%C = \%MO (0.58)$ , empleada por Vela-Correa et al. (2012), en donde %C corresponde al carbono orgánico (%), MO es la materia orgánica (%), y el 0.58 corresponde a que la materia orgánica del suelo contiene un 58% de C.

Todos los análisis estadísticos se realizaron usando los softwares SYSTAT v. 12 y Past v. 4.09. El nivel de significancia para todos los análisis fue de 0.05.

#### VI.5. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de normalidad de los datos de biomasa mediante el estadístico de Shapiro Wilk ( $p > 0.05$ ). Por medio de un Modelo Lineal General (MLG) se analizó el efecto del sitio, la ubicación y el diámetro de raíces sobre la biomasa de raíces. Se utilizó el análisis de comparación múltiple de Tukey como prueba post hoc. En el efecto del tipo de raíces solo se consideró los niveles de muy finas (MF) y finas (F), debido a que los datos de las raíces gruesas (G) no pudieron normalizarse. Los datos de raíces MF y F fueron normalizados

mediante la transformación de Box-Cox con un valor de  $\lambda$  óptimo de 0.335869. Para los datos de las raíces gruesas se utilizaron las pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis ( $p < 0.05$ ) y Mann-Whitney ( $p < 0.05$ ), para comparar los sitios y la ubicación.

Los resultados del análisis del suelo fueron descritos estadísticamente para cada fragmento mediante el cálculo de la media y la desviación estándar (DE). Al mismo tiempo, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA), para conocer si existían diferencias significativas entre las medias de cada sitio y las características fisicoquímicas. Posteriormente, se aplicó la prueba de Tukey de comparación múltiple de medias.

Así mismo, se realizaron análisis de correlación de Spearman y regresiones lineales entre la cantidad de biomasa vs. el diámetro a la altura del pecho de los árboles y el porcentaje de cobertura del dosel al interior de cada fragmento. Para calcular el C almacenado en biomasa, se consideró como el 50% de la misma, multiplicando por el factor 0.5.

## **VII. Resultados**

### **VII.1. Caracterización ambiental de los sitios**

Los tres fragmentos mostraron suelos francos y ácidos (Tabla 2). Xochicoatlán tuvo el suelo menos ácido, pero con mayor conductividad eléctrica, materia orgánica, y C orgánico en comparación con los otros fragmentos (Tabla 2). El % C orgánico promedio total en suelo fue de 3.93.

Tabla 2. Caracterización físico-química de los suelos, se muestra el promedio  $\pm$  Desviación Estándar (DE). Potencial de hidrógeno (pH); Conductividad eléctrica (C.E.); Materia orgánica (MO); Carbono orgánico (CO). Letras diferentes indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ) dentro de las columnas.

Sitio	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	MO (%)	CO (%)	Textura
Huayacocotla	4.11 $\pm$ 0.14 <sup>a</sup>	0.11 $\pm$ 0.02 <sup>ab</sup>	4.64 $\pm$ 2.96 <sup>a</sup>	2.69 $\pm$ 1.72 <sup>a</sup>	Franco-Arenoso
Tlanchinol	4.33 $\pm$ 0.12 <sup>ab</sup>	0.10 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	5.51 $\pm$ 4.43 <sup>a</sup>	3.20 $\pm$ 2.57 <sup>a</sup>	Franco-Limoso
Xochicoatlán	4.46 $\pm$ 0.07 <sup>b</sup>	0.14 $\pm$ 0.01 <sup>b</sup>	10.15 $\pm$ 1.00 <sup>a</sup>	5.89 $\pm$ 0.58 <sup>a</sup>	Franco-Arenoso

El bosque en Tlanchinol tuvo los árboles con mayor DAP, mientras que en Xochicoatlán y Huayacocotla presentaron significativamente los valores más bajos (Figura 3). No se observaron diferencias en la cobertura entre Tlanchinol y Xochicoatlán, pero Huayacocotla presentó valores significativamente más bajos.

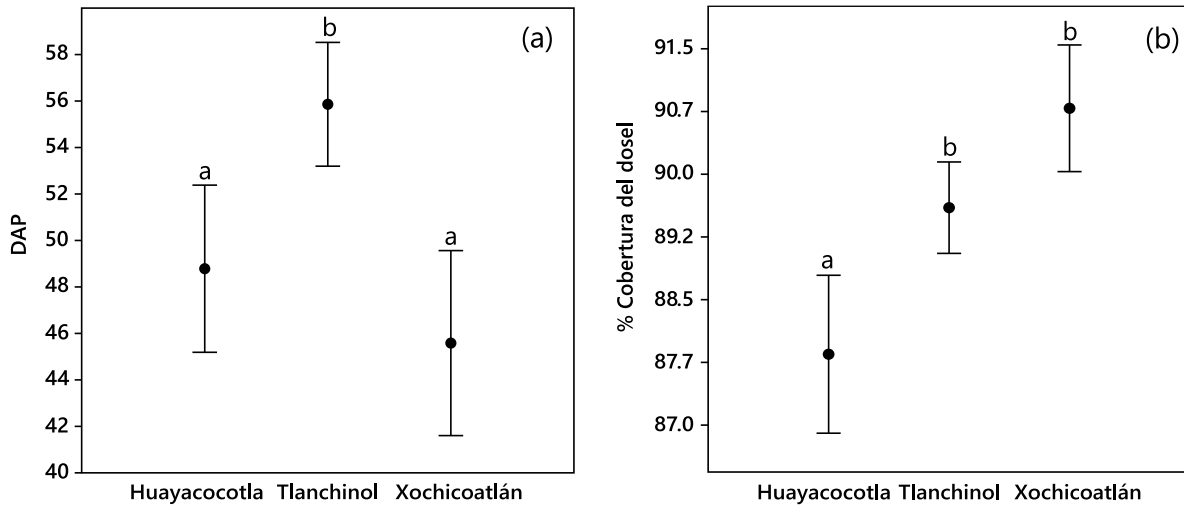


Figura 3. (a) Comparación entre la cantidad de biomasa ( $\text{g m}^{-2}$ ) por sitio y el Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) entre sitios. (b) Comparación entre la cantidad de biomasa ( $\text{g m}^{-2}$ ) y el porcentaje de cobertura arbórea entre sitios. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba de Mann-Whitney ( $p < 0.05$ ).

## VII.2. Biomasa de raíces y estimación de carbono

La biomasa promedio entre los tres sitios fue de  $707.68 \pm 150.41 \text{ g m}^{-2}$ . Del total de biomasa, las raíces gruesas contribuyeron con 36.8 %, las finas con 35.5 % y las muy finas con 27.7 %. Tlanchinol fue el sitio con mayor contribución de biomasa de raíces con 41.5 % (Tabla 3). El carbono estimado a partir del 50% de la biomasa fue de  $353.84 \pm 75.21 \text{ g C m}^{-2}$ .

Tabla 3. Biomasa promedio por cada sitio y por diámetro. Carbono total promedio por sitio. Se muestra el promedio  $\pm$  D.E.

Sitio	Raíces muy finas (<1 mm)	Raíces finas (1-3 mm)	Raíces Gruesas (> 3 mm)	Biomasa total (g m <sup>-2</sup> )	Carbono total (g C m <sup>-2</sup> )
Huayacocotla	137.27 $\pm$ 85.41	226.46 $\pm$ 124.81	247.35 $\pm$ 537.68	611.09	305.55
Tlanchinol	211.54 $\pm$ 92.66	306.37 $\pm$ 168.50	363.07 $\pm$ 453	880.99	440.50
Xochicoatlán	239.40 $\pm$ 117.15	220.50 $\pm$ 162.63	171.09 $\pm$ 201.66	630.98	315.50
Promedio	196.07 $\pm$ 52.79	251.11 $\pm$ 47.95	260.50 $\pm$ 96.66	707.68	353.85

Se registraron diferencias estadísticamente significativas entre las variables: sitio y diámetro, y las interacciones: sitio\*ubicación y sitio\*diámetro (Tabla 4). En la tabla y figura 4 se aprecia que la biomasa total de raíces fue estadísticamente diferente entre sitios ( $F = 13.43$ ,  $p < 0.001$ ). En particular se observó que la biomasa total de Tlanchinol y Xochicoatlán fue significativamente mayor en comparación con Huayacocotla. Las raíces muy finas tuvieron significativamente menor biomasa en Huayacocotla y Tlanchinol con relación a la biomasa de las raíces finas (Figura 4). Respecto a la ubicación, existieron diferencias significativas solo dentro de Tlanchinol ( $F = 5.13$ ,  $p = 0.006$ ; Tabla 4) con mayor biomasa cerca de los árboles (Figura 5).



Tabla 4. Análisis de varianza del efecto del sitio, ubicación y diámetro sobre la biomasa de raíces muy finas y finas.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
<b>Sitio</b>	<b>2</b>	<b>37.589</b>	<b>18.7946</b>	<b>13.43</b>	<b>&lt; 0.001</b>
Ubicación	1	0.048	0.0484	0.03	0.853
<b>Diámetro</b>	<b>1</b>	<b>17.278</b>	<b>17.278</b>	<b>12.35</b>	<b>&lt; 0.001</b>
<b>Sitio*Ubicación</b>	<b>2</b>	<b>14.365</b>	<b>7.1824</b>	<b>5.13</b>	<b>0.006</b>
<b>Sitio*Diámetro</b>	<b>2</b>	<b>28.588</b>	<b>14.294</b>	<b>10.21</b>	<b>&lt; 0.001</b>
Ubicación*Diámetro	1	1.713	1.7126	1.22	0.269
Error	350	489.828	1.3995		
Falta de ajuste	2	2.87	1.4351	1.03	0.36
Error puro	348	486.958	1.3993		
Total	359	589.409			

Nota: los datos en negritas indican significancia de  $p < 0.05$ .

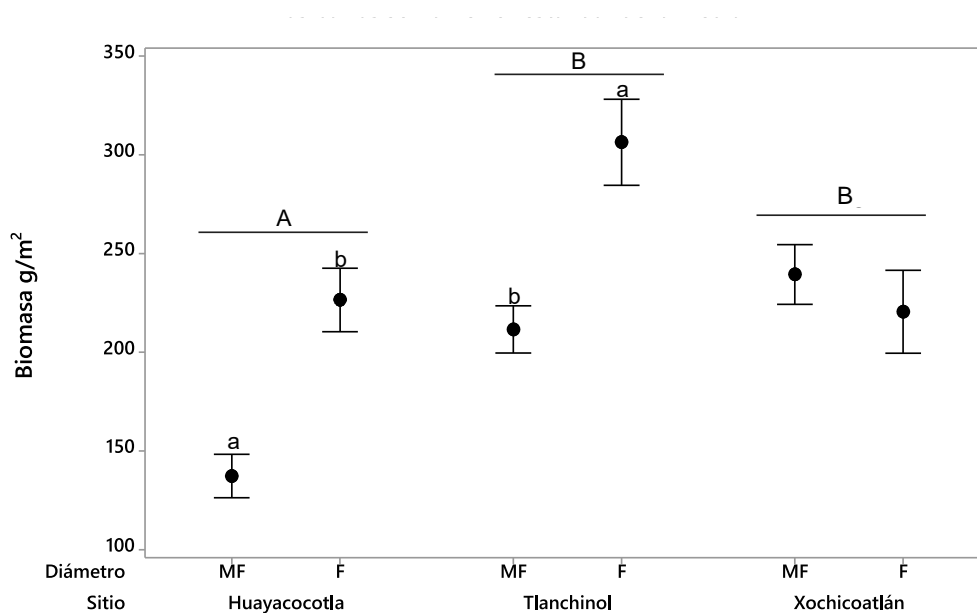


Figura 4. Comparación de biomasa de raíces ( $\text{g m}^{-2}$ ) muy finas  $< 1 \text{ mm}$  (MF) y de  $1-3 \text{ mm}$  finas (F) dentro de cada sitio y entre sitios. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba post-hoc de Tukey ( $p < 0.05$ ).

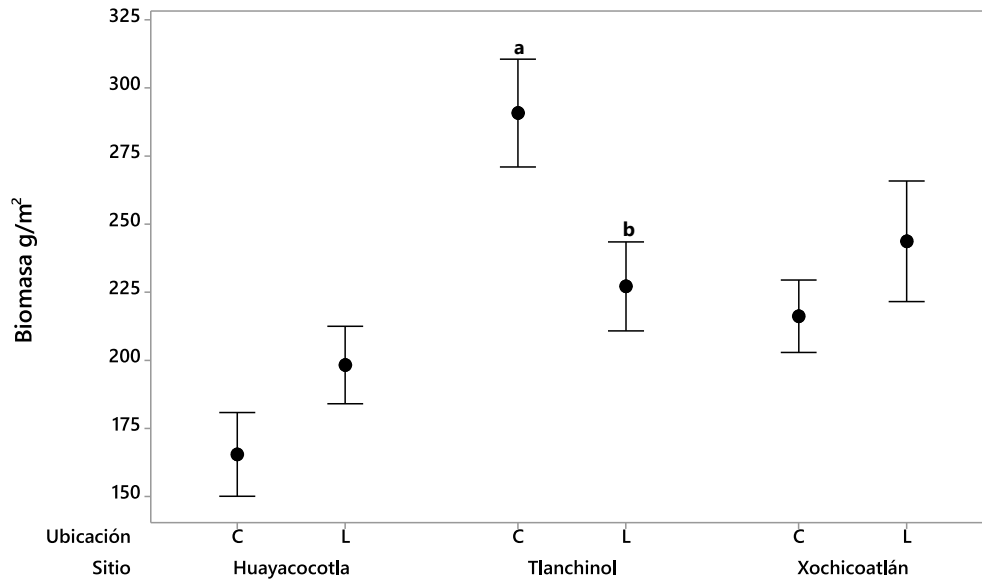


Figura 5. Comparación de biomasa de raíces ( $\text{g m}^{-2}$ ) muy finas (MF) y finas (F), en cerca (C) y lejos (L) del árbol dentro de cada sitio. Letras diferentes indican diferencias significativas según la prueba post-hoc de Tukey ( $p < 0.05$ ).

La interacción de Diámetro\*Sitio fue significativa ( $F = 10$ ,  $p < 0.001$ ) (Figura 4). Para las raíces muy finas, se encontró que los fragmentos de bosque en Huayacocotla tuvieron una menor biomasa respecto a Tlanchinol (Tukey  $q = 6.03$ ,  $n = 120$ ,  $p = 0.002$ ) y Xochicoatlán (Tukey  $q = 7.42$ ,  $n = 120$ ,  $p < 0.001$ ). En relación con las raíces finas, se observó que Tlanchinol tuvo una mayor biomasa que Huayacocotla (Tukey  $q = 4.13$ ,  $n = 120$ ,  $p = 0.031$ ) y Xochicoatlán (Tukey  $Q = 5.23$ ,  $n = 120$ ,  $p = 0.023$ ).

Para las raíces gruesas no se identificaron diferencias significativas entre los tres sitios (Kruskall-Wallis  $H = 5.31$ ,  $p = 0.064$ ; Figura 6). Adicionalmente, al comparar la biomasa de raíces gruesas según la disposición espacial (“cerca” y “lejos”) dentro de cada sitio, tampoco se observaron diferencias significativas (Figura 6).

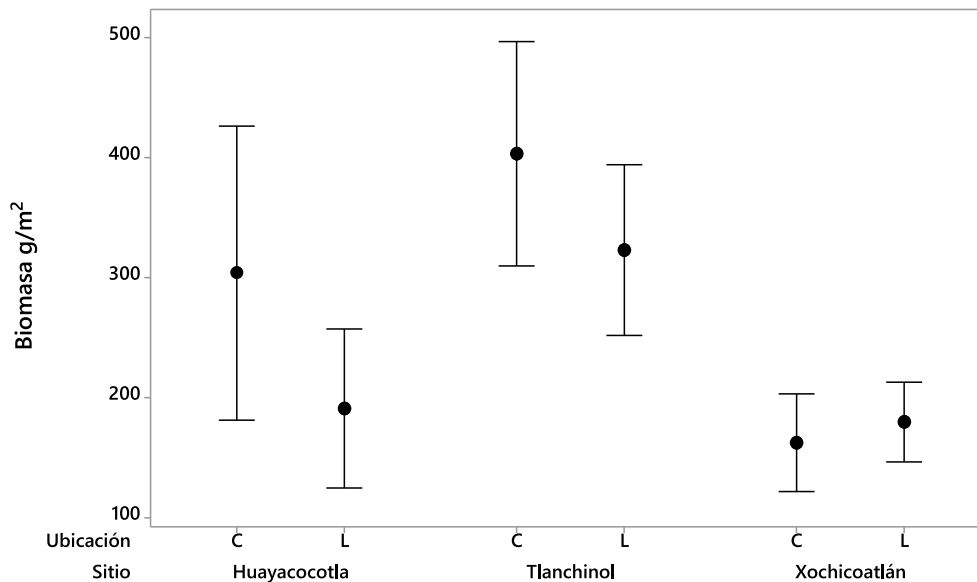


Figura 6. Comparación de biomasa de raíces ( $\text{g m}^{-2}$ ) gruesas “cerca” (C) y “lejos” (L) entre sitios.

### VII.3. Correlaciones entre la biomasa, el Diámetro a la Altura del Pecho y la cobertura

La relación entre la biomasa ( $\text{g m}^{-2}$ ) de raíces y el DAP fue significativa únicamente para los datos de Huayacocotla ( $r_s = 0.406$ ,  $p = 0.003$ ). No se obtuvo correlación significativa entre la biomasa de raíces y la cobertura para ningún sitio de muestreo, pues cuentan con rangos de cobertura del 89.25 al 91 %.

### VII. 4. Contenido de carbono en suelo

El C orgánico del suelo (COS) calculado para cada fragmento fue  $146.30 \text{ Mg C ha}^{-1} \pm 7.62$  (Xochicoatlán),  $93.25 \text{ Mg C ha}^{-1} \pm 45.19$  (Tlanchinol) y  $85.16 \text{ Mg C ha}^{-1} \pm 42.21$  (Huayacocotla).

El C total almacenado en el suelo (C en raíces + COS) por fragmento fue de  $88.21 \text{ Mg C ha}^{-1}$  para Huayacocotla,  $97.65 \text{ Mg C ha}^{-1}$  para Tlanchinol, y  $149.46 \text{ Mg C ha}^{-1}$  para Xochicoatlán. El C subterráneo total promedio para el BN de la SMO fue de  $111.77 \text{ Mg C ha}^{-1} \pm 32.97$ .

## VIII. Discusión

### VIII.1. Biomasa subterránea de raíces

El bosque de niebla tiene una gran capacidad de captura de C. Para el área de estudio la biomasa promedio fue de  $707.68 \text{ g m}^{-2}$ , que representó un valor de  $353.84 \text{ g C m}^{-2}$ . En el estado de Veracruz, México, en se ha reportado almacenamiento en biomasa aérea hasta de  $17\,437 \text{ g C m}^{-2}$  (Vizcaíno-Bravo, 2017), el valor corresponde a diferentes tipos de uso de suelo. Los valores de biomasa y carbono de raíces en bosques de niebla siguen siendo escasos (Álvarez-Arteaga, 2010; Cai et al., 2019; Gómez et al., 2021; Quintero-Gradilla et al., 2022).

Existen diferencias significativas en la interacción sitio\*diámetro, en donde el promedio por diámetro para raíces MF, F y G, oscila entre  $196.07 \text{ g m}^{-2}$  y  $260.50 \text{ g m}^{-2}$ . Estas cantidades son menores a las reportadas por Álvarez-Arteaga et al. (2013), para el bosque de niebla de Oaxaca, en donde encuentran, a una altitud de 1500 a 1950 m s.n.m., un total de  $420 \text{ g m}^{-2}$  y  $1633 \text{ g m}^{-2}$  para raíces finas. El rango de altitud donde realizaron el estudio es similar al de los muestreos de este trabajo, el cual fue de 1620 a 1876 m s.n.m. No obstante, estas diferencias en la cantidad de biomasa pueden deberse a que ellos consideraron como raíces finas a aquellas menores de 5 mm; mientras que en el presente estudio se consideraron como raíces finas aquellas de 1-3 mm. Meave (2006) y Álvarez-Arteaga (2010), indicaron que las diferencias en la cantidad de biomasa se relacionan con la estructura y composición florística de las comunidades vegetales. Por otro lado, Moser et al. (2011) obtuvieron en un bosque montano, una biomasa para raíces finas de  $562 \text{ g m}^{-2}$  (1540 m s.n.m.) y  $518 \text{ g m}^{-2}$  (1890 m s.n.m.) y para raíces gruesas,  $3\,072 \text{ g m}^{-2}$  (1540 m s.n.m.) y  $1\,990 \text{ g m}^{-2}$  (1890 m s.n.m.), respectivamente. En ese trabajo las raíces finas las consideraron  $< 1\text{mm}$  y las raíces gruesas como aquellas  $> 2 \text{ mm}$  de diámetro.

Huayacocotla presentó un valor promedio de raíces finas de  $226.46 \text{ g m}^{-2}$ , el cual es bajo en comparación con los otros dos fragmentos. Sin embargo, es mayor al documentado por Giardin et al. (2014), para un bosque tropical montano de los Ande en Perú, en donde obtienen una biomasa de  $141 \text{ g m}^{-2}$  para la “Esperanza”, y  $190 \text{ g m}^{-2}$  para “Wayqecha”. En cambio, para raíces gruesas reportaron biomasa promedio de  $32 \text{ g m}^{-2}$  y  $25 \text{ g m}^{-2}$  para las mismas zonas. Estos valores son pequeños en comparación al valor aquí obtenido para raíces gruesas,

de 260.50 g m<sup>-2</sup>. Asimismo, Tlanchinol fue el fragmento con mayor biomasa promedio (880.99 g m<sup>-2</sup>; Tabla 3; Figura 4).

Los resultados aquí reportados indican que el efecto *sitio* fue una variable estadísticamente significativa, lo cual puede considerarse como un factor determinante en la cantidad de biomasa (Tabla 4). Por ejemplo, en un bosque tropical de montaña húmedo en Brasil, establecieron para una estación seca y una húmeda, una biomasa de 875.22 y 451.04 g m<sup>-2</sup>, respectivamente (Rosado et al., 2011). Hertel et al. (2003) analizaron la biomasa a una profundidad del suelo de 19 cm, en tres tipos de bosque montano en Costa Rica: 1) bosque de sucesión temprana, con 31 g m<sup>-2</sup>; 2), bosque de sucesión media con 337 g m<sup>-2</sup>; 3), bosque antiguo no perturbado con 1128 g m<sup>-2</sup>. Este último valor es más alto que el promedio reportado en el presente estudio, con 707.68 g m<sup>-2</sup>. También en Monteverde, Costa Rica, Vance y Nadkarni (1992) realizaron muestreos a una profundidad de 0 a 20 cm reportando una biomasa total que entre 1 600 g m<sup>-2</sup> y 7 200 g m<sup>-2</sup> y una biomasa de raíces finas (<2 mm) entre 300 g m<sup>-2</sup> y 1300 g m<sup>-2</sup>. Los valores bajos (1600 y 300 g m<sup>-2</sup>) se encontraron en una ladera. Estos datos son similares a los reportados por Arteaga et al. (2013). La biomasa subterránea radicular varía ampliamente debido a los métodos de muestreo, la época, y las características propias del sitio pudiendo generar resultados variables y difíciles de comparar (Quintero-Gradilla et al., 2022). Algunos de los factores que determinan el crecimiento de la biomasa de raíces, son la edad de los individuos, las variables ambientales como la temperatura del aire y la precipitación afectan el suelo y la disponibilidad de nutrientes (Finér et al., 2011).

También existen reportes de biomasa en bosques nublados para Sulawesi Central, Indonesia, en donde, se calculó una biomasa promedio de raíces finas de 408 g m<sup>-2</sup> de 0 a 50 cm de profundidad (Leuschner et al., 2006). Por otra parte, en la región de Chimalapas, Oaxaca, determinaron una media de 315 g m<sup>-2</sup> y 246.33 g m<sup>-2</sup> para bosques de niebla con sustratos metamórficos y sedimentarios respectivamente (Asbjornsen et al., 2005). Recientemente, Quintero-Gradilla y colaboradores (2022), en BN de la Sierra de Manantlán han dado a conocer una biomasa promedio de 434 g m<sup>-2</sup> para raíces <2 mm y para raíces >2 mm un valor de 1144 g m<sup>-2</sup>. La mayoría de los estudios se enfocan a la biomasa de raíces finas (<2 mm, o incluso <5 mm). Pocos trabajos han considerado la biomasa de raíces gruesas, este sesgo de

datos puede deberse a lo complicado que es muestrear raíces de diámetros más grandes a diversas profundidades, ya que las raíces gruesas se encuentran a profundidades mayores de 30 cm, es un procedimiento costoso que implica contar con equipo especializado que no es muy accesible de transportar (Siles et al., 2017).

Pese a las diferencias en la cantidad de biomasa reportada en otros estudios, la cantidad de biomasa total obtenida en los resultados (Tabla 3) está dentro de lo observado para otros BN (referencias). Las raíces gruesas no tuvieron diferencias significativas entre los tres fragmentos, sin embargo, Tlanchinol tuvo más biomasa que los otros fragmentos. Dicho esto, la hipótesis planteada sobre que la proporción de raíces gruesas sea menor que las raíces muy finas y finas, por haber muestreado a una profundidad de ~30 cm en donde las raíces < 3 mm son más abundantes, no fue corroborada, ya que los resultados arrojaron una biomasa total promedio de 260.50 g m<sup>-2</sup>.

## VIII.2. Almacenamiento de carbono

La compleja heterogeneidad del bosque de niebla, ocasiona variación en los valores reportados de la biomasa y el C almacenado, incluso en lugares cercanos uno del otro (Vizcaíno-Bravo, 2017). En este estudio se reportó el contenido de C almacenado en raíces empleando el valor promedio de carbono de 0.5, el cual corresponde al 50% de la biomasa (Díaz-Franco et al., 2016; Gómez-García & Pérez-Rodríguez, 2015). Este valor está suficientemente respaldado para los cálculos de contenido de C a partir de datos de biomasa, ya sea aérea o subterránea (Carrillo-Anzúres et al., 2018).

El COS reportado aquí osciló de 8 516 a 14 630 g C m<sup>-2</sup> (85.16 y 146.30 Mg C ha<sup>-1</sup>), estas estimaciones se encuentran en el rango de valores reportados para México, por ejemplo, en “Los Altos”, Chiapas, Mendoza-Vega et al. (2003), reportan 3 180 g C m<sup>-2</sup>. En la misma zona de estudio, De Jong y colaboradores (1999) ubicaron en 46 800 g C m<sup>-2</sup> el almacén total de C, donde 3 600 g C m<sup>-2</sup> correspondieron a la biomasa de raíces y 24 280 g C m<sup>-2</sup> es almacenamiento de C en suelo. Existe una pequeña diferencia en la cantidad de COS del año 1999 al 2003, por lo que se puede suponer que los valores de C en biomasa de raíces en “Los Altos” han disminuido un 12%. En Huatusco, Veracruz, estimaron un total de 4 815 g C m<sup>-2</sup>

(Masuhara et al. 2015). Dichos valores son altos en comparación de los resultados de C para raíces aquí manifestados (Tabla 3).

Por otra parte, Etchevers et al. (2001) reportaron un total 25 500 g C m<sup>-2</sup> en un bosque de liquidámbar con 15 200 g C m<sup>-2</sup> en suelo y 332 g C m<sup>-2</sup> para raíces. Estas estimaciones se asemejan a lo obtenido en este trabajo. En los Andes de Perú, el C de raíces osciló entre 556 g C m<sup>-2</sup> (sitio Esperanza) y 736 g C m<sup>-2</sup> (sitio Wayqecha) (Girardin et al., 2014). Para los resultados reportados aquí, Tlanchinol fue el sitio con mayor cantidad de C almacenado con 440.50 g C m<sup>-2</sup> para raíces y 9 325 g C m<sup>-2</sup> para suelo. Quintero-Gradilla y colaboradores (2022) indican un almacenamiento de C de 498 g C m<sup>-2</sup> en donde el 56% de este, se almacenó en raíces gruesas.

Moser et al. (2011) al estimar biomasa y C en dos altitudes diferentes, en raíces finas obtuvieron 266 g C m<sup>-2</sup> (1540 m s.n.m.) y 281 g C m<sup>-2</sup> (1890 m s.n.m.) y para raíces gruesas, 1 489 g C m<sup>-2</sup> (1540 m s.n.m.) y 965 g C m<sup>-2</sup> (1890 m s.n.m.), respectivamente. Las raíces finas las consideraron < 1 mm y las raíces gruesas como aquellas > 2 mm de diámetro. En los resultados reportados en este trabajo no se obtuvieron datos de C por tipo de raíces, no obstante, el C total estimado fue de 353 g C m<sup>-2</sup> (Tabla 3), este valor de C coincide con lo reportado por Moser y colaboradores (2011) para las raíces finas. Sin embargo, en cuanto al COS + la biomasa de raíces en este trabajo se obtuvo un total de 10 824 g C m<sup>-2</sup> para suelo y 353 g C m<sup>-2</sup> para raíces, valores más altos que los reportados por Avilés et al. (2009) en donde obtuvieron 4 811 g C m<sup>-2</sup> para suelo y 223 g C m<sup>-2</sup> para raíces en una profundidad de 15-30 cm.

Existen factores ambientales que pueden influir en la biomasa contenida, como la época y la profundidad de muestreo. Los muestreos en el presente estudio se realizaron en época de secas con influencia de frentes fríos (Báez et al., 1997; Muñoz-Villers et al., 2015), no obstante, está documentado que la biomasa tiende a incrementar conforme hay mayor humedad (Gómez et al., 2021; Meier & Leuschner, 2008), es decir, que en época de lluvias se esperaría tener mayor cantidad de biomasa. De acuerdo con lo anterior, resulta complejo estandarizar resultados y métodos utilizados para estimar la biomasa de raíces, además de que la mayoría de las investigaciones son específicas para algunas localidades y aún existen muchas áreas sin evaluar (Graciano-Ávila et al., 2019), por lo cual es importante continuar

con investigaciones relacionadas con la biomasa de raíces y propiedades del suelo, para así conseguir herramientas que permitan obtener mejores estimaciones de captura y almacenamiento de C.

Tanto la biomasa, como la diferencia en la cantidad de C almacenado se encuentran relacionadas con factores bióticos como estructura de la vegetación, composición de especies y propiedades fisicoquímicas del suelo (Lwila et al., 2021), su grado de compactación y otras condiciones edáficas diversas, al mismo tiempo que puede existir variación por las especies vegetales dominantes (Pavón et al., 2012). En este sentido, no se evaluaron especies particulares, debido a que los estudios de biomasa de raíces forestales, pueden determinar la biomasa total sin distinguir entre raíces de vegetación de sotobosque y raíces de árboles, o bien pueden tratar la biomasa de raíces del árbol y del sotobosque por separado (Cairns et al., 1997; Finér et al., 2011; Jackson et al., 1996; Vogt et al., 1998). No obstante, aunque las raíces no fueron clasificadas por especies, se observó la dominancia de varios individuos del género *Liquidambar*, *Quercus*, *Clethra*; estas especies dominantes coinciden con lo reportado por Williams-Linera et al. (2013) y Ruiz-Jiménez et al. (2012) en otros BN. De forma general, estos géneros se caracterizan por ostentar especies que alcanzan tallas muy grandes dentro del BN (Williams-Linera et al., 2013), además de que la mayoría de los árboles de esta comunidad sostienen a varias especies de epífitas, que junto con el follaje del bosque contribuyen a interceptar mucha de la radiación lumínica generando condiciones de alta penumbra (Ramírez-Marcial et al., 1998). Incluso, la semejanza en la estructura de la vegetación de los géneros dominantes, puede deberse a que han pasado por los mismos acontecimientos climáticos e históricos constituyendo floras similares en origen y evolución (Luna-Vega et al., 1988).

### VIII.3. Características de los sitios (Propiedades de los suelos)

La distribución de las raíces finas en el perfil del suelo se encuentra relacionada con las características físicas y químicas del mismo (Fujimaki et al., 2004). A pesar de que no se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de C orgánico de cada sitio, el fragmento de Xochicoatlán, mostró un mayor porcentaje de C orgánico en comparación de



los otros dos fragmentos, esto pudo deberse a que el suelo contenía mayor acumulación de materia orgánica (Tabla 2), tales como hojas, raíces, ramas, frutos y fauna, y, tal vez por la fracción orgánica asociada a la matriz mineral (Álvarez-Arteaga et al., 2012; Contreras-Santos et al., 2021).

Debido a que el C orgánico se obtiene a partir de la materia orgánica, tiene sentido que Xochicoatlán tenga mayor porcentaje de esta también. Los tres fragmentos poseen suelos francos, esto coincide con otros estudios en BN donde indican que los suelos presentan texturas franco arcillosas, franco arenosas y franco limosas (Bautista-Cruz et al., 2005), además de tener suelos profundos con alta cantidad de materia orgánica (González-Espinosa et al., 2012).

Post et al. (1982), reportaron correlación entre el clima y el contenido de carbono orgánico de suelo (COS), particularmente entre la precipitación y la temperatura. La variación en el COS puede explicarse por el clima, o bien, por la influencia de las especies predominantes de árboles y plantas.

EL pH es también un factor que afecta la productividad de raíces (Cai et al., 2019), en este sentido, se observa que los tres fragmentos de muestreo presentan suelos ácidos (Tabla 2). La acidez es bastante común en los BN, incluso pueden presentar niveles de acidez extrema y una acumulación importante de restos orgánicos en la superficie del suelo (Álvarez-Arteaga et al., 2008). Otros autores también han descrito una elevada acidez en los BN, con pH de 2-4, esto coincide con los resultados de este trabajo, pues la acidez reportada fue de pH 4 (Tabla 2). De acuerdo con Zhou et al. (2017), los suelos ácidos pueden favorecer a las raíces, al inhibir el crecimiento y la actividad microbiana. Por lo tanto, los suelos con un pH más bajo pueden potencialmente estimular el crecimiento de las raíces (Yuan & Chen, 2010). Los bosques de niebla al tener suelos bastante ácidos, dejan ver la gran importancia que tiene la biomasa de raíces como reservorio de C.

En general, los suelos de los tres fragmentos muestreados presentaron una baja conductividad eléctrica ( $< 1$ ), denotando una buena salud del ecosistema forestal, ya que altos niveles de salinidad en suelo afectan negativamente el crecimiento de la biomasa (Maas & Hoffman, 1977).

#### VIII.4. Biomasa cerca y lejos del fuste

Solo existieron diferencias significativas en el fragmento Tlanchinol respecto a la biomasa de raíces finas y gruesas entre cerca vs lejos de los fustes de los árboles. Lo mismo ocurrió con las raíces gruesas. Esto coincide con lo discutido por Macinnis-Ng et al. (2010), quienes indicaron que la distribución de biomasa de raíces gruesas se encuentra relacionada con la distancia desde el fuste del árbol en comparación de las raíces finas, las cuales se distribuyen de forma más uniforme. Al mismo tiempo, aludieron que la mayor cantidad de biomasa de raíces gruesas se encuentra dentro de los 1.5 a 2 metros de radio cercanos al fuste (Macinnis-Ng et al., 2010; Zhang et al., 2014). Así mismo, la biomasa de las raíces tanto gruesas como medias tienen una correlación cercana con el diámetro de los tallos de los árboles (Finér et al., 2011; Gómez et al., 2021; Yanai et al., 2006).

En consecuencia, la hipótesis que habría mayor biomasa de raíces cerca de los árboles (Ares & Peinemann, 1992; Dhyani & Tripathi, 2000; Raizada et al., 2013), solo se confirmó en el fragmento Tlanchinol, por lo cual, la hipótesis fue respaldada parcialmente. En el fragmento Huayacocotla y Xochicoatlán la mayoría de las raíces se encontraron lejos de los árboles. Estos resultados podrían reflejar la disponibilidad de nutrientes, pues la distribución de raíces finas reflejará la distribución de nutrientes dentro de un ecosistema, ya que son las encargadas de buscar dichos nutrientes en donde se encuentren con mayor abundancia para asimilarlos (Vitousek & Sanford, 1986). Esto último también se ha sido reportado para la biomasa de raíces finas, las cuales se mantienen homogéneas conforme se aumenta la distancia a los árboles (Millikin & Bledsoe, 1999).

Como se mencionó anteriormente, la humedad juega un papel sustancial en la distribución de raíces pues, aunque exista disponibilidad de nutrientes alta, el agua es el medio por el cual estos se transportan al sistema vegetal. Esto también podría explicar porque en los demás sitios de muestreo no hubo diferencias, pues los fragmentos de Huayacocotla y Xochicoatlán pueden considerarse como sitios de bosque densos, con suelos homogéneos en nutrientes y agua y, por ende, en biomasa.

### VIII.5. Características de la vegetación (biomasa, diámetro a la altura del pecho y cobertura del dosel)

Se conoce que el DAP tiene relación con la biomasa aérea (Trautenmüller et al., 2019); sin embargo, también se ha documentado que se correlaciona con la biomasa de raíces (Chen et al., 2004; Finér et al., 2011). Al ser Tlanchinol el fragmento con árboles de mayor DAP, la hipótesis sobre el efecto positivo del DAP en la cantidad de raíces es apoyada, pues estas tienden a proporcionar un soporte estructural contra la inestabilidad de árboles grandes. (Zhang et al., 2014). No obstante, la correlación de Spearman indicó que el DAP solo tiene una ligera relación con la biomasa de Huayacocotla ( $r_s=0.406$ ,  $p=0.039$ ). Chen et al. (2004), reportaron que las correlaciones entre DAP y biomasa si existen, pero una correlación fuerte, solo se da a nivel de rodal. De acuerdo con Ter-Mikaelian & Korzukhin (1997), la diferencia metodológica entre las estimaciones de la biomasa aérea y la biomasa de la raíz fina es que la biomasa de los componentes aéreos suele estimarse a nivel de árbol, mientras que la biomasa de la raíz fina suele estimarse a nivel de rodal, pues vincular las raíces finas a un árbol concreto es muy complicado (Vogt et al., 1998). En este estudio las correlaciones de biomasa y DAP se estimaron a nivel de árbol, por lo que se sugiere, en futuras investigaciones, realizar correlaciones con otras variables, tales como disponibilidad de nutrientes, humedad, textura, material parental y área basal (Fonseca et al., 2013; Quinto-Mosquera et al., 2016). Sin embargo, la biomasa de raíces gruesas tuvo tendencia positiva con respecto al DAP de los árboles, tal como ha sido reportado por Gómez y colaboradores (2021).

Leuschner y colaboradores (2006), indicaron que la biomasa de raíces finas aumentó en más de un 100% desde un bosque con cobertura de 75%, hasta un rodal con 90%. Este intervalo coincide con los valores obtenidos en los fragmentos de BN estudiados en este trabajo (Figura 3), por lo cual podría ser una señal de que la cobertura si se relaciona positivamente con la biomasa. La cobertura puede influir en la biomasa subterránea, pues se tienen antecedentes de que la biomasa disminuye al aumentar la distancia desde un árbol con un radio de copa de 3.6 m. En dicho árbol, 47% de las raíces se encontraban a 1.8 m del árbol, el 35% a 3.6 m y el 18% a 5.4 m (Millikin & Bledsoe, 1999). A pesar de que Xochicoatlán y Tlanchinol tuvieron mayor porcentaje de cobertura en comparación con Huayacocotla, se observó una

alta homogeneidad en cuanto a la cobertura del dosel y por lo tanto no se registraron diferencias significativas. En Huayacocotla, tanto los valores de porcentaje de cobertura como la biomasa fueron bajos, pues una reducción en el porcentaje de cobertura se relacionó con la más baja biomasa de raíces. Por otro lado, las intervenciones negativas a estos ecosistemas forestales debido actividades humanas, reducen significativamente la biomasa de raíces finas de los árboles y por ende el secuestro de carbono asociado, incluso si se llevan a cabo sólo a intensidades moderadas (Leuschner et al., 2006).

Mientras que las raíces finas están distribuidas más uniformemente (Macinnis-Ng et al., 2010), debido a su funcionalidad absorbente, es de esperar que forrajeen sobre todo el piso del bosque (Vitousek & Sanford, 1986). En condiciones secas, los árboles pueden extender sus raíces mucho más allá que los árboles que crecen en lugares más húmedos, que concentran sus raíces bajo la sombra de sus copas (Belsky, 1994).

La humedad es determinante para el crecimiento y distribución de las raíces. En condiciones de sequía, los árboles pueden extender sus raíces más allá del dosel y los árboles de sitios más húmedos concentran su crecimiento de sus raíces debajo del dosel. Esto debido a que las raíces cuando se extienden lateralmente están en busca de mayor acceso a agua, en comparación con las raíces que permanecen debajo del dosel o cerca del tronco, en donde los nutrientes son más abundantes (Belsky, 1994)

Por otra parte, en el sentido de la caracterización vegetal, es importante resaltar la importancia del BN en comparación con otros ecosistemas, pues posee una composición mixta de especies de afinidad templada y tropical (CONABIO, 2010; Rzedowski, 2006). Por lo anterior, se le reconoce como un ecosistema con gran potencial de producción de biomasa y almacenamiento de C en contraste con otros bosques. Por ejemplo, en un bosque pluvial tropical en Colombia se registraron en dos localidades una biomasa total promedio de 609.5 g m<sup>-2</sup> y un promedio 464 g C m<sup>-2</sup> (Quinto-Mosquera et al., 2016). En los Tuxtlas en una zona de bosque tropical se registra biomasa de 150 g m<sup>-2</sup> y un contenido de C de 200 g C m<sup>-2</sup> (Jaramillo et al., 2003). En bosques templados de pino-encino Pavón et al. (2012) reportan 206 g m<sup>-2</sup>. Quintero-Gradilla et al. (2022) obtienen para un bosque de pino una biomasa de raíces de 372 g m<sup>-2</sup> y 162 g C m<sup>-2</sup>. En bosques de *Quercus* sp. en la Reserva Natural de Baotianman, China, encontraron hasta 276 g m<sup>-2</sup> de biomasa (Liu et al., 2017). En bosques

boreales reportan hasta  $528 \text{ g m}^{-2}$  (Yuan & Chen, 2010). Finalmente, en un estudio de los bosques de niebla en los Andes Peruanos, reportaron carbono total promedio de  $646 \text{ g C m}^{-2}$  (Girardin et al., 2014). Los valores reportados en el presente trabajo tanto para biomasa de raíces como para C y COS, se encuentran en el rango reportado anteriormente, las cuales no solo corresponden para BN en México. En el anexo 1 se muestran valores de biomasa y C en otros bosques de niebla y bosques montanos, además de otras características propias de los sitios de muestreo.

## **IX. Conclusiones**

Los almacenes de carbono en biomasa subterránea y suelo de los bosques de niebla de la zona centro-este de la Sierra Madre Oriental son un reservorio importante, ya que proporcionan diversos servicios ambientales, principalmente el de mitigar el cambio climático por su alto potencial de secuestro de C.

La biomasa de raíces MF y F contribuyeron con 63.2% del total dado que son, en general, más abundantes a los 30 cm de profundidad. La biomasa promedio osciló entre 611.09 y 880.99  $\text{g m}^{-2}$  y el C total entre 305.55 y 440.50  $\text{g C m}^{-2}$ . Así mismo, se reporta una biomasa total promedio de  $707 \pm 150.41 \text{ g m}^{-2}$  y un C de  $353 \pm 75.21 \text{ g C m}^{-2}$ . En cuanto al C total estimado para los BN del presente estudio (C orgánico del suelo + C de biomasa de raíces) fue de  $11\ 117 \text{ g C m}^{-2}$  ( $111.77 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ). Del cual  $10\ 824 \text{ g C m}^{-2}$  corresponden a suelo, estos valores se encuentran en el rango reportado para otros BN en México.

Debido a que los sitios de muestreo eran homogéneos en cobertura, no se encontraron relaciones significativas con respecto a la biomasa. El diámetro a la altura del pecho (DAP) se correlacionó positivamente con la biomasa en un fragmento de BN.

Las variaciones en los reservorios de carbono del BN, pueden estar sujetas a los cambios en la estructura y composición florística, además de condiciones edáficas diversas para la zona de estudio. En general se requieren más estudios detallados para medir las reservas de carbono de la parte subterránea en otros BN y complementar los datos con la parte aérea, pues, para

lograr la mitigación del cambio climático es preciso contar con la información básica de estimación de biomasa y C en los diferentes depósitos que puede tener un ecosistema.

## X. Literatura citada

- Acosta Mireles, M., Carrillo Anzures, F., & Gómez Villegas, R. G. (2011). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 529-543. <https://doi.org/10.29312/remexca.v2i4.1638>
- 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.
- Adams, W. A. (1973). The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. *Journal of Soil Science*, 24(1), 10-17. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1973.tb00737.x>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.015>
- Adedeji, O., Reuben, O., & Olatoye, O. (2014). Global Climate Change. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 02(02), 114-122. <https://doi.org/10.4236/gep.2014.22016>
- Aguilar-López, M., Rojas-Martínez, A. E., Cornejo, C., Vite-Silva, V. D., & Ruano-Escalante, Y. R. (2013). Lista taxonómica y estructura del ensamblaje de los mamíferos terrestres del municipio de Tlanchinol, Hidalgo, México. *Mastozoología Neotropical*, 20(2), 229-242.
- Álvarez-Arteaga, G. (2010). *Evaluación de la captura y estabilidad del carbón en un ecosistema de bosque mesófilo de montaña a lo largo del gradiente altitudinal en la Sierra Norte de Oaxaca* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México]. [http://132.248.9.195/ptb2010/junio/0659315/0659315\\_A1.pdf](http://132.248.9.195/ptb2010/junio/0659315/0659315_A1.pdf)
- Álvarez-Arteaga, G., García-Calderón, N. E., Krasilnikov, P. V., Sedov, S. N., Targulian, V. O., & Velázquez-Rosas, N. (2008). Soil altitudinal sequence on base-poor parent material in a montane cloud forest in Sierra Juárez, Southern Mexico. *Geoderma*, 144(3-4), 593-612. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.025>

- Álvarez-Arteaga, G., García-Calderón, N. E., Krasilnikov, P., & García-Oliva, F. (2013). Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la Sierra Norte de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 47, 171-180.
- Álvarez-Arteaga, G., Krasilnikov, P., & García-Calderón, N. E. (2012). Vertical distribution and soil organic matter composition in a montane cloud forest, Oaxaca, Mexico. *European Journal of Forest Research*, 131(6), 1643-1651. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0643-4>
- Álvarez-Arteaga, G., Krasilnikov, P., & García-Calderón, N. E. (2014). *Los bosques montanos de niebla en México: Heterogeneidad ambiental y almacenes de carbono* (M. E. Orozco-Hernández & P. Mireles-Lezama, Eds.; 1ra edición). Universidad Autónoma del Estado de México.
- Ares, A., & Peinemann, N. (1992). Fine-root distribution of coniferous plantations in relation to site in southern Buenos Aires, Argentina. *Canadian Journal of Forest Research*, 22(11), 1575-1582. <https://doi.org/10.1139/x92-209>
- Asbjornsen, H., & Manson, R. (2015). *La gestión de cuencas hidrográficas para asegurar los servicios ecosistémicos en las laderas del neotrópico. Capítulo 7: Estudios de caso. Gestión de cuencas hidrográficas mediante pagos por servicios hidrológicos: Experiencias de México en el centro de Veracruz.* (J. S. Hall, V. Kirn, & E. Yanguas-Fernández, Eds.). Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales.
- Asbjornsen, H., Velázquez-Rosas, N., García-Soriano, R., & Gallardo-Hernández, C. (2005). Deep ground fires cause massive above- and below-ground biomass losses in tropical montane cloud forests in Oaxaca, Mexico. *Journal of Tropical Ecology*, 21(4), 427-434. <https://doi.org/10.1017/S0266467405002373>
- Avilés-Hernández, V., Velázquez-Martínez, A., Angeles-Pérez, G., EtcheversBarra, J., De los Santos-Posadas, H., & Llanderal, T. (2009). Variación en almacenes de carbono en suelos de una toposecuencia. *Agrociencia*, 43(5), 457-464.
- Badillo-Saldaña, L. M., Ramírez-Bautista, A., & Wilson, L. D. (2016). Effects of establishment of grazing areas on diversity of amphibian communities in tropical evergreen forests and mountain cloud forests of the Sierra Madre Oriental. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(1), 133-139. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2015.09.019>



- Báez, A. P., Padilla, H., Cervantes, J., Pereyra, D., & Belmont, R. (1997). Rainwater chemistry at the eastern flanks of the Sierra Madre Oriental, Veracruz, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *102*(D19), 23329-23336. <https://doi.org/10.1029/97JD02077>
- Bautista-Cruz, A., Gutiérrez-Catorena, Ma. del C., Castillo-Sánchez, R. R., & Etchevers-Barra, J. D. (2005). Cronosecuencia de un suelo y su clasificación en un área originalmente ocupada por bosque mesófilo de montaña. *Terra Latinoamericana*, *23*(2), 147-157.
- Belsky, A. J. (1994). Influences of Trees on Savanna Productivity: Tests of Shade, Nutrients, and Tree-Grass Competition. *Ecology*, *75*(4), 922-932. <https://doi.org/10.2307/1939416>
- Berish, C. W. (1982). Root biomass and surface area in three successional tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, *12*(3), 699-704. <https://doi.org/10.1139/x82-104>
- Bolin, B., Döös, B., Pagar, J., & Warrick, R. (1986). *The Green House Effect, Climate Change and Ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Brassard, B. W., Chen, H. Y. H., Bergeron, Y., & Paré, D. (2011). Coarse root biomass allometric equations for *Abies balsamea*, *Picea mariana*, *Pinus banksiana*, and *Populus tremuloides* in the boreal forest of Ontario, Canada. *Biomass and Bioenergy*, *35*(10), 4189-4196. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.045>
- Breymer, A., Hall, D. O., Melillo, J. M., & Ågren, G. I. (Eds.). (1996). *Global change: Effects on coniferous forests and grasslands*. J.Wiley.
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Cai, H., Li, F., & Jin, G. (2019). Fine root biomass, production and turnover rates in plantations versus natural forests: Effects of stand characteristics and soil properties. *Plant and Soil*, *436*(1-2), 463-474. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03948-8>
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, *111*(1), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s004420050201>

- Campbell, C. A., & de Jong, R. (2001). Root-to-straw ratios—Influence of moisture and rate of N fertilizer. *Canadian Journal of Soil Science*, 81(1), 39-43. <https://doi.org/10.4141/S00-027>
- Carrillo-Anzúres, F., Acosta-Mireles, M., Flores-Ayala, E., Juárez-Bravo, J. E., & Bonilla-Padilla, E. (2018). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(5), 779-793. <https://doi.org/10.29312/remexca.v5i5.901>
- Cavelier, J., Estevez, J., & Arjona, B. (1996). Fine-Root Biomass in Three Successional Stages of an Andean Cloud Forest in Colombia. *Biotropica*, 28(4), 728. <https://doi.org/10.2307/2389059>
- Chen, W., Zhang, Q., Cihlar, J., Bauhus, J., & Price, D. T. (2004). Estimating fine-root biomass and production of boreal and cool temperate forests using aboveground measurements: A new approach. *Plant and Soil*, 265(1-2), 31-46. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8503-3>
- CONABIO. (2010). *El Bosque Mesófilo de Montaña en México: Amenazas y Oportunidades para su Conservación y Manejo Sostenible* (Vol. 1). Comisión Nacional Para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.
- Contreras-Santos, J. L., Martínez-Atencia, J., & Falla-Guzman, C. K. (2021). Carbono acumulado en raíces de especies vegetales en sistemas silvopastoriles en el Norte de Colombia. *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 52-69. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.3>
- Covington, W. W., Fulé, P. Z., Moore, M. M., Hart, S. C., Kolb, T. E., Mast, J. N., Sackett, S. S., & Wagner, M. R. (1997). Restoring Ecosystem Health in Ponderosa Pine Forests of the Southwest. *Journal of Forestry*, 95(4), 23-29. <https://doi.org/10.1093/jof/95.4.23>
- De Jong, B. H. J., Cairns, M., Haggerty, P., Ramírez-Marcial, N., Ochoa-Ganoa, S., Mendoza-Vega, J., González-Espinosa, M., & March-Misfut, I. (1999). Land-Use Change and Carbon Flux Between 1970s and 1990s in Central Highlands of Chiapas, Mexico. *Environmental Management*, 23(3), 373-385. <https://doi.org/10.1007/s002679900193>

- Dhyani, S. K., & Tripathi, R. S. (2000). Biomass and production of fine and coarse roots of trees under agrisilvicultural practices in north-east India. *Agroforestry Systems*, 50(2), 107-121. <https://doi.org/10.1023/A:1006439018621>
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., & Etchevers-Barra, J. D. (2016). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. Et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34. <https://doi.org/10.21829/myb.2007.1311233>
- Ern, H. (1973). Repartición, ecología e importancia económica de los bosques de coníferas de los estados mexicanos Puebla-Tlaxcala. *Fundación Alemana para la Investigación Científica. México, Comunicaciones. Proyecto Puebla-Tlaxcala*, 7, 21-23.
- Etchevers, J., Acosta, M., Monreal, C., Quednow, K., & Jiménez, L. (2001). *Los stocks de carbono en los diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México*. 39-50.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.10.016>
- Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M., & Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 0(46), 37-50. <https://doi.org/10.15359/rca.46-2.4>
- Fujimaki, R., Tateno, R., Hirobe, M., Tokuchi, N., & Takeda, H. (2004). Fine root mass in relation to soil N supply in a cool temperate forest: Fine root mass in relation to soil N. *Ecological Research*, 19(5), 559-562. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1703.2004.00669.x>
- Gárate, M., & Blanco, J. A. (2013). Importance of root biomass characterization when simulating forest ecosystems. *Ecosistemas*, 22(3), 66-73. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.10>
- García-de la Cruz, Y., Ramos-Prado, J. M., Quintanar-Isaías, P. A., & Hernández-Ramírez, A. M. (2014). Bosque de niebla: Importancia, situación actual y manejo. *Elementos*, 93, 23-29.

- Gerez-Fernández, P. (2013). *Procesos locales de deforestación y recuperación de bosques: Retos de recuperación en el centro de Veracruz* [Tesis de doctorado]. Universidad Autónoma de México.
- Girardin, C. A. J., Espejob, J. E. S., Doughty, C. E., Huasco, W. H., Metcalfe, D. B., Durand-Baca, L., Marthews, T. R., Aragao, L. E. O. C., Farfán-Rios, W., García-Cabrera, K., Halladay, K., Fisher, J. B., Galiano-Cabrera, D. F., Huaraca-Quispe, L. P., Alzamora-Taype, I., Eguiluz-Mora, L., -Revilla, N. S., Silman, M. R., Meir, P., & Malhi, Y. (2014). Productivity and carbon allocation in a tropical montane cloud forest in the Peruvian Andes. *Plant Ecology & Diversity*, 7(1-2), 107-123. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.820222>
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Campo, J., Paustian, K., & Asensio, C. (2021). Carbono orgánico del suelo y su relación con la biomasa radical de *Quercus* sp. *Madera y Bosques*, 27(4). <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2742445>
- Gómez-Díaz, J. D. (2008). *Determinación de los almacenes de carbono en los compartimentos aéreo y subterráneo de dos tipos de vegetación en la reserva de la biosfera "Sierra de Huautla", Morelos, México* [Tesis de doctorado]. Colegio de Postgraduados.
- Gómez-García, E., & Pérez-Rodríguez, F. (2015). Evolución de la biomasa y del carbono acumulado por *Quercus robur* en Galicia (España). *Bosque (Valdivia)*, 36(2), 255-264. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000200011>
- González-Espinosa, M., Meave, J. A., Ramírez-Marcial, N., Toledo-Aceves, T., Lorea-Hernández, F. G., & Ibarra-Manríquez, G. (2012). Los bosques de niebla de México: Conservación y restauración de su componente arbóreo. *Ecosistemas*, 21(1-2), 36-52.
- González-Molina, L., Etchevers-Barra, J., & Hidalgo-Moreno, C. (2008). Carbono en suelos de ladera: Factores que deben considerarse para determinar su cambio en el tiempo. *Agrociencia*, 42(7), 741-751.
- Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J., Mora-Olivo, A., & Buendía-Rodríguez, E. (2019). ESTIMACIÓN DE VOLUMEN, BIOMASA Y CONTENIDO DE CARBONO EN UN BOSQUE DE CLIMA TEMPLADO-FRÍO DE DURANGO, MÉXICO. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 42(2), 119-127. <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.2.119-127>

- Gual-Díaz, M., & Rendón-Correa, A. (Eds.). (2014). *Bosques mesófilos de montaña de México: Diversidad, ecología y manejo*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Hernández-Velázquez, L. (2016). *Composición florística y estructura de la vegetación del bosque de pino-encino de Huayacocotla, Veracruz* [Maestría]. Universidad Veracruzana.
- Hertel, D., Leuschner, C., & Holscher, D. (2003). Size and Structure of Fine Root Systems in Old-growth and Secondary Tropical Montane Forests (Costa Rica). *Biotropica*, 35(2), 143-153. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2003.tb00274.x>
- Högberg, P., Nordgren, A., & Ågren, G. I. (2002). Carbon allocation between tree root growth and root respiration in boreal pine forest. *Oecologia*, 132(4), 579-581. <https://doi.org/10.1007/s00442-002-0983-8>
- INEGI. (1992). *Síntesis geográfica del estado de Hidalgo*. INEGI.
- INEGI. (2007). *Carta de uso de suelo y vegetación. Serie IV, escala 1:250 000* [Map]. INEGI.
- INEGI. (2009). *Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Gobierno del estado de Hidalgo.
- INEGI. (2016). *Carta de uso de suelo y vegetación. Áreas de bosque mesófilo de montaña*. INEGI.
- INTA. (2012). *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Manual de Manejo de Suelos*.
- Jackson, R. B., Canadell, J., Ehleringer, J. R., Mooney, H. A., Sala, O. E., & Schulze, E. D. (1996). A Global Analysis of Root Distributions for Terrestrial Biomes. *Oecologia*, 108(3), 389-411.
- Jackson, R. B., Mooney, H. A., & Schulze, E.-D. (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94(14), 7362-7366. <https://doi.org/10.1073/pnas.94.14.7362>
- Jaramillo, V. J., Ahedo-Hernández, R., & Kauffman, J. B. (2003). Root biomass and carbon in a tropical evergreen forest of Mexico: Changes with secondary succession and forest conversion to pasture. *Journal of Tropical Ecology*, 19(4), 457-464. <https://doi.org/10.1017/S0266467403003493>

- Jiménez Rodríguez, C., & Arias Aguilar, D. (2004). *Distribución de la biomasa y densidad de raíces finas en una gradiente sucesional de bosques en la Zona Norte de Costa Rica*. 1(2), 20.
- John, B., Pandey, H. N., & Tripathi, R. S. (2001). Vertical distribution and seasonal changes of fine and coarse root mass in *Pinus kesiya* Royle Ex. Gordon forest of three different ages. *Acta Oecologica*, 22(5-6), 293-300. [https://doi.org/10.1016/S1146-609X\(01\)01118-3](https://doi.org/10.1016/S1146-609X(01)01118-3)
- Juárez-Medina, A. K. (2008). *Biodiversidad de la flora del bosque mesófilo de montaña del municipio de Huayacocotla, Veracruz, México* [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Karizuma, N. (1974). *The mechanism and function of tree root in the Process of Forest Production*. (Vol. 259). Bull GovFor. Exp.Sta.
- Karki, H., Bargali, K., & Bargali, S. S. (2021). Spatial and Seasonal Pattern of Fine Root Biomass and Turnover Rate in Different Land Use Systems in Central Himalaya, India. *Russian Journal of Ecology*, 52(1), 36-48. <https://doi.org/10.1134/S1067413621010070>
- Leuschner, C., Wiens, M., Harteveld, M., Hertel, D., & Tjitrosemito, S. (2006). Patterns of Fine Root Mass and Distribution along a Disturbance Gradient in a Tropical Montane Forest, Central Sulawesi (Indonesia). *Plant and Soil*, 283(1-2), 163-174. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-6638-5>
- Litton, C. M., Raich, J. W., & Ryan, M. G. (2007). Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology*, 13(10), 2089-2109. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01420.x>
- Liu, C., Xiang, W., Lei, P., Deng, X., Tian, D., Fang, X., & Peng, C. (2014). Standing fine root mass and production in four Chinese subtropical forests along a succession and species diversity gradient. *Plant and Soil*, 376(1-2), 445-459. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1998-0>
- Liu, Y., Liu, S., Wan, S., Wang, J., Wang, H., & Liu, K. (2017). Effects of experimental throughfall reduction and soil warming on fine root biomass and its decomposition in a warm temperate oak forest. *Science of The Total Environment*, 574, 1448-1455. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.116>

- López-Juárez, A. (1982). *Estudio epizootiológico y de frecuencia de nematodos gastroentéricos en bovinos del municipio de Xochicoatlán, Estado de Hidalgo, en el periodo de Julio a diciembre de 1981*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Luna-Vega, I., Almeida-Leñero, L., & Lorenzo, L. (1988). Reconocimiento florístico y consideraciones fitogeográficas del bosque mesófilo de montaña de Teocelo, Veracruz. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 48, 35-63.
- Luna-Vega, I., Ocegueda, S., & Alcántara, O. (1994). Florística y notas biogeográficas del bosque mesófilo de montaña del municipio de Tlanchinol, Hidalgo, México. *Anales del Instituto de Biología, UNAM*, 65, 31-52.
- Lwila, A. S., Mund, M., Ammer, C., & Glatthorn, J. (2021). Site conditions more than species identity drive fine root biomass, morphology and spatial distribution in temperate pure and mixed forests. *Forest Ecology and Management*, 499, 119581. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119581>
- Ma, H., Mo, L., Crowther, T. W., Maynard, D. S., van den Hoogen, J., Stocker, B. D., Terrer, C., & Zohner, C. M. (2021). The global distribution and environmental drivers of aboveground versus belowground plant biomass. *Nature Ecology & Evolution*, 5(8), 1110-1122. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01485-1>
- Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop Salt Tolerance-Current Assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103, 115-134.
- MacDicken, K. G. (1997). *A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects*.
- Macinnis-Ng, C. M. O., Fuentes, S., O'Grady, A. P., Palmer, A. R., Taylor, D., Whitley, R. J., Yunusa, I., Zeppel, M. J. B., & Eamus, D. (2010). Root biomass distribution and soil properties of an open woodland on a duplex soil. *Plant and Soil*, 327(1-2), 377-388. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0061-7>
- Makita, N., Kosugi, Y., Dannoura, M., Takanashi, S., Niiyama, K., Kassim, A. R., & Nik, A. R. (2012). Patterns of root respiration rates and morphological traits in 13 tree species in a tropical forest. *Tree Physiology*, 32(3), 303-312. <https://doi.org/10.1093/treephys/tps008>

- Marek, K. J., & Rattan, L. (2005). Soil organic carbon sequestration rates in two long-term no-till experiments in ohio. *Soil Science*, 170(4), 280-291. <https://doi.org/10.1097/00010694-200504000-00005>
- Masuhara, A., Valdés, E., Gutierrez, D., Vázquez, J. C., Salcedo, E., Juárez, M., & Merino, A. (2015). Carbono almacenado en diferentes sistemas agroforestales de café en Huatusco, Veracruz, México. *Revista Amazónica de Ciencia y Tecnología*, 4(1), 66-93.
- Mayorga-Saucedo, R., Luna-Vega, I., & Alcántara-Ayala, O. (1998). Florística del bosque mesófilo de montaña de Molocotlán, Molango-Xochicoatlán, Hidalgo, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 63, 101-119.
- Meave, J. A., Rincón, A., & Romero-Romero, M. A. (2006). Oak Forests of the Hyper-Humid Region of La Chinantla, Northern Oaxaca Range, Mexico. En M. Kappelle (Ed.), *Ecology and Conservation of Neotropical Montane Oak Forests* (Vol. 185, pp. 113-125). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/3-540-28909-7\\_9](https://doi.org/10.1007/3-540-28909-7_9)
- Meier, I. C., & Leuschner, C. (2008). Belowground drought response of European beech: Fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands across a precipitation gradient: BELOWGROUND DROUGHT RESPONSE OF BEECH. *Global Change Biology*, 14(9), 2081-2095. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01634.x>
- Mendoza-Vega, J., Karlton, E., & Olsson, M. (2003). Estimations of amounts of soil organic carbon and fine root carbon in land use and land cover classes, and soil types of Chiapas highlands, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 177(1-3), 191-206. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00439-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00439-5)
- Millikin, C. S., & Bledsoe, C. S. (1999). Biomass and distribution of fine and coarse roots from blue oak (*Quercus douglasii*) trees in the northern Sierra Nevada foothills of California. *Plant and Soil*, 214(1/2), 27-38. <https://doi.org/10.1023/A:1004653932675>
- Miranda, F., & Sharp, A. J. (1950). Characteristics of the Vegetation in Certain Temperate Regions of Eastern Mexico. *Ecology*, 31(3), 313-333. <https://doi.org/10.2307/1931489>
- Morales, A. (1997, junio). *Memoria del simposio internacional sobre posibilidades de manejo forestal sostenible en América tropical*.



- Moser, G., Leuschner, C., Hertel, D., Graefe, S., Soethe, N., & Iost, S. (2011). Elevation effects on the carbon budget of tropical mountain forests (S Ecuador): The role of the belowground compartment: ELEVATION EFFECTS ON FOREST CARBON CYCLING. *Global Change Biology*, 17(6), 2211-2226. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02367.x>
- Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Alvarado-Barrientos, M. S., Geissert, D., Marín-Castro, B., Gómez-Tagle, A., McDonnell, J., Asbjornsen, H., Dawson, T., & Adrian Bruijnzeel, L. (2015). Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(3), 395-407. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300007>
- Newbold, P. J. (1968). *Methods of estimating root production. En UNESCO, Functioning of terrestrial ecosystems at the primary production level.* UNESCO.
- Ochoa-Ochoa, L. M., Mejía-Domínguez, N. R., & Bezaury-Creel, J. (2017). Prioritization for Cloud Forest Conservation in Mexico. *Ecosistemas*, 26(2), 27-37. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-2.04>
- Pavón, N. P. (2005). Biomass and root production of two plant life forms in a semiarid Mexican scrub: Responses to soil nitrogen availability. *Canadian Journal of Botany*, 83(10), 1317-1321. <https://doi.org/10.1139/b05-113>
- Pavón, N. P., & Meza-Sánchez, M. (2009). *Cambio climático en el estado de Hidalgo: Clasificación y tendencias climáticas.* Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- 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*, XVIII(3), 303-312. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.07.052>
- Paz-Pellat, F., & Velázquez-Rodríguez, A. S. (2018). Base de datos de perfiles de suelos en México. *Programa Mexicano del Carbono*, 2(3), 210-235.
- Plan Municipal de Desarrollo Huayacocotla, Veracruz. (2018). *Plan Municipal de Desarrollo Huayacocotla, Veracruz. 2018-2021. Proyección al 2038.*
- Post, W. M., Emanuel, W. R., Zinke, P. J., & Stangenberger, A. G. (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298(5870), 156-159. <https://doi.org/10.1038/298156a0>

- Prado, R. B., Fidalgo, E. C. C., Monteiro, J. M. G., Schuler, A. E., Vezzani, F. M., Garcia, J. R., Oliveira, A. P. de, Viana, J. H. M., Pedreira, B. da C. C. G., Mendes, I. de C., Reatto, A., Parron, L. M., Clemente, E. de P., Donagemma, G. K., Turetta, A. P. D., & Simões, M. (2016). Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, *51*, 1021-1038. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900002>
- Quintero-Gradilla, S. D., Muñoz, A., & Castillo-Parra, V. M. (2022). Estimación de carbono en las raíces en bosques de la Sierra de Manantlán, México. *Madera y Bosques*, *28*(2), 1-10. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822431>
- 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. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.1.a04>
- Raizada, A., Jayaprakash, J., Rathore, A. C., & Tomar, J. M. S. (2013). Distribution of fine root biomass of fruit and forest tree species raised on old river bed lands in the north west Himalaya. *Tropical Ecology*, *54*(2), 251-261.
- Ramirez-Marcial, N., Ochoa-Gaona, S., Gonzalez-Espinosa, M., & Quintana-Ascencio, P. F. (1998). Análisis florístico sucesional en la estación biológica Cerro Huitepec, Chiapas, México. *Acta Botanica Mexicana*, *44*, 59-85. <https://doi.org/10.21829/abm44.1998.806>
- Rodríguez-Laguna, R., Jiménez-Pérez, J., Aguirre-Calderón, A., Treviño-Garza, E., & Razo-Zárate, R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai*, *5*(3), 317-327.
- Rosado, B. H. P., Martins, A. C., Colomeu, T. C., Oliveira, R. S., Joly, C. A., & Aidar, M. P. M. (2011). Fine root biomass and root length density in a lowland and a montane tropical rain forest, SP, Brazil. *Biota Neotropica*, *11*(3), 203-209. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032011000300018>
- Ruiz-Jiménez, C. A., Téllez-Valdés, O., & Luna-Vega, I. (2012). Clasificación de los bosques mesófilos de montaña de México: Afinidades de la flora. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *83*(4). <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2012.4.1012>

- Rzedowski, J. (1996). Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botanica Mexicana*, 35, Article 35. <https://doi.org/10.21829/abm35.1996.955>
- Rzedowski, J. (2006). Capítulo 18. Bosque mesófilo de Montaña. En *Vegetación de México* (1ra. Edición digital, p. 504). Comisión Nacional Para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. <https://www.biodiversidad.gob.mx/publicaciones/librosDig/pdf/VegetacionMxC18.pdf>
- Sánchez-Silva, S., Bernardus HJ., D. J., Huerta-Lwanga, E., Mendoza-Vega, J., Morales-Ruiz, D., & Deb R., A. (2022). Fine root biomass stocks but not the production and turnover rates vary with the age of tropical successional forests in Southern Mexico. *Rhizosphere*, 21, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2022.100474>
- Santantonio, D., Hermann, R., & Overton, W. (1977). Root biomass studies in forest ecosystems. *Pedobiologia*, 17, 1-31.
- Segura-Castruita, M. A., Sánchez-Guzmán, P., Ortiz-Solorio, C. A., & Gutierrez-Castorena, M. del C. (2005). Carbono orgánico de los suelos de México. *Terra Latinoamericana*, 23(1), 21-28.
- Siles, P. G., Talavera, P., Andino-Rugama, F., & Alaniz, L. (2017). Composición florística, estructura y biomasa de los bosques de pino-encino en la reserva Santa Rosa, Tisey, Estelí, Nicaragua. *Revista de Biología Tropical*, 65(2), 763-775.
- Sutil de Oliveira- Pesa Paes, L., de Lima, M. R., Kaschuk, G., & Machado-Vezzani, F. (2018). Desarrollo de las raíces como indicador de la sustentabilidad del suelo de los sistemas de cultivo en el bioma de la mata atlántica. *Cultivos Tropicales*, 39(2), 7-14.
- Ter-Mikaelian, M. T., & Korzukhin, M. D. (1997). Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 97(1), 1-24. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00019-4)
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33(2), 141-163. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>

- Trautenmüller, J. W., Péllico Netto, S., Balbinot, R., Dalla Corte, A. P., & Borella, J. (2019). Path analysis applied to evaluation of biomass estimates in subtropical forests at Brazil. *FLORESTA*, 49(3), 587. <https://doi.org/10.5380/RF.V49I3.60782>
- Vance, E. D., & Nadkarni, N. M. (1992). Root biomass distribution in a moist tropical montane forest. *Plant and Soil*, 142(1), 31-39. <https://doi.org/10.1007/BF00010172>
- Vargas-Ajuria, Y. A. (1982). *Análisis florístico y fitogeográfico de un bosque mesófilo de montaña en Huayacocotla, Veracruz* [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vela-Correa, G., López-Blanco, J., & Rodríguez-Gamillo, M. de L. (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 77, 18-30.
- Villaseñor, J. L. (2010). *El bosque húmedo de montaña en México y sus plantas vasculares: Catálogo florístico-taxonómico* (Primera edición). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villaseñor, J. L. (2016). Checklist of the native vascular plants of Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(3), 559-902. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.06.017>
- Vitousek, P. M., & Sanford, R. L. (1986). Nutrient Cycling in Moist Tropical Forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17(1), 137-167. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.001033>
- Vizcaíno-Bravo, M. Q. (2017). *Biodiversidad Arbórea y Contenido de Carbono Aéreo en Diversos Usos del Suelo en la Región del Bosque de Niebla en el Centro de Veracruz, México* [Tesis de Maestría]. Universidad Veracruzana.
- Vogt, K. A., Vogt, D. J., & Bloomfield, J. (1998). Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forest at an ecosystem level. *Plant and Soil*, 200(1), 71-89. <https://doi.org/10.1023/A:1004313515294>
- Williams-Linera, G. (2012). *El bosque de niebla del centro de Veracruz: Ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático*. CONABIO-Instituto de Ecología, A.C.

- Williams-Linera, G., Toledo-Garibaldi, M., & Hernández, C. G. (2013). How heterogeneous are the cloud forest communities in the mountains of central Veracruz, Mexico? *Plant Ecology*, 214(5), 685-701. <https://doi.org/10.1007/s11258-013-0199-5>
- Yanai, R. D., Park, B. B., & Hamburg, S. P. (2006). The vertical and horizontal distribution of roots in northern hardwood stands of varying age. *Canadian Journal of Forest Research*, 36(2), 450-459. <https://doi.org/10.1139/x05-254>
- Yuan, Z. Y., & Chen, H. Y. H. (2010). Fine Root Biomass, Production, Turnover Rates, and Nutrient Contents in Boreal Forest Ecosystems in Relation to Species, Climate, Fertility, and Stand Age: Literature Review and Meta-Analyses. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 29(4), 204-221. <https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483579>
- Zhang, C., Chen, L., & Jiang, J. (2014). Vertical root distribution and root cohesion of typical tree species on the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Land*, 6(5), 601-611. <https://doi.org/10.1007/s40333-014-0004-x>
- Zhou, Z., Wang, C., Zheng, M., Jiang, L., & Luo, Y. (2017). Patterns and mechanisms of responses by soil microbial communities to nitrogen addition. *Soil Biology and Biochemistry*, 115, 433-441. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.015>

## Anexo 1.

### Base de datos de biomasa y carbono en bosques de niebla y bosques montanos.

Cita	Valor original de biomasa de raíces	Biomasa de raíz total convertido a g m <sup>2</sup>	Valor original de contenido de C	Contenido de C total convertido a g m <sup>2</sup>	Ubicación	Coordenadas	Especies vegetales y características	Tipo de vegetación	Características ambientales
Acosta et al., 2001	N/D	N/D	Profundidad de 0-15 cm: 4.7Mg C ha <sup>-1</sup> . Profundidad de 15-30 cm: 1.2Mg C ha <sup>-1</sup> . Profundidad de 30-45cm: 0.5 Mg C ha <sup>-1</sup> . Total 6.4	213	N/D	N/D	N/D	Bosque de liquidámbar.	N/D
Acosta-Mireles et al., 2009	N/D	N/D	212 Mg ha <sup>-1</sup>	21200	Tlacotal y el Nacimiento, ejido Mariano de Matamoros, Tlaxcala, México.	19° 40' 15" y 19°43' 00"N: 98° 12' 49" y 98° 15' 12" O.	<i>Pinus</i> , <i>Abies</i> , <i>Quercus</i> , <i>Agnus</i> sp., <i>Arbutus</i> sp.	Bosque de oyamel, pino-oyamel y oyamel-encino	Altitud promedio de 2875 m. Pendiente varía del 35%. Suelos de origen residual y volcánico. Textura media o arenosa. Suelo suave de color oscuro, rico en materia orgánica y nutrientes.
Álvarez et al., 2009	N/D	N/D	Altitud de 1500: 34.4 Mg C ha <sup>-1</sup> . Altitud de 1950: 16.43Mg C ha <sup>-1</sup> . Altitud de 2050: 18.15 Mg C ha <sup>-1</sup> . Altitud de 2400: 18.99 Mg C ha <sup>-1</sup> . Altitud de 2500: 12.66 Mg C ha <sup>-1</sup> . Total 100.63	2012.6	Región Chinantla Sierra norte Oaxaca, México.	N/D	N/D	Bosque montano de niebla	N/D
Álvarez-Arteaga et al., 2013	1500m: 4.20 Mg ha <sup>-1</sup> . 1950m: 16.33 Mg ha <sup>-1</sup> . 2050: 18.92 Mg ha <sup>-1</sup> . 2400: 12.08 Mg ha <sup>-1</sup> . 2500: 4.23 Mg ha <sup>-1</sup> . Total: 55.76 Mg ha <sup>-1</sup> .	1115.2	1500: 28.8 Mg C ha <sup>-1</sup> . 1950: 22.1 Mg C ha <sup>-1</sup> . 2050: 21.1 Mg C ha <sup>-1</sup> . 2400: 20.1 Mg C ha <sup>-1</sup> . 2500: 39.4 Mg C ha <sup>-1</sup> . Total: 131.5 C ha <sup>-1</sup>	2630	Santa cruz Tepetolutla, Sierra norte de Oaxaca, México.	17° 38'-17° 40' N y 96° 32'-96° 33' O.	Líquenes y epífitas. <i>Quercus</i> sp.	BMM. Bosques montanos bajos. Afinidad con bosques premontanos húmedos.	Relieve montañoso, humedad relativa alta. Gran biodiversidad. Material geológico de esquistos de mica y clorita con poca cuarcita. Clima es templado húmedo con lluvias abundantes en verano. Precipitación media anual 5800mm. Temperatura media anual es 16.5 °C.

Asbjornsen et al., 2005	Para bosques de suelos metamórficos: 315 g m <sup>-2</sup> y para bosque con suelos sedimentarios: 246.33 g m <sup>-2</sup> .	280.67	N/D	N/D	Chimalapas, Oaxaca, México.	N/D	N/D	Bosque nubado, bosque tropical montano.	Topografía montañosa, con elevaciones que oscilan entre 500 y 2500 m s.n.m. El clima es Aw2 (cálido subhúmedo) a Cw2 (subhúmedo templado). Los TMCF se entre 1.600 y 2.300 m s.n.m., con bosques nubosos en los picos y crestas más elevados
Avilés et al., 2009	N/D	N/D	Cresta: 15.68 t C ha <sup>-1</sup> . Ladera: 9.36 t C ha <sup>-1</sup> . Valle: 12.35 t C ha <sup>-1</sup> . Planicie: 11.09 t C ha <sup>-1</sup> . Total: 48.48	1212	La mojonera, Zacualtipán, Hidalgo, México.	N/D	<i>Fagus grandifolia</i> subsp. Mexicana, <i>Magnolia schiedeana</i> , <i>Clethra macrophylla</i> , <i>Quercus spp.</i>	Bosque de <i>Fagus</i> , mesófilo de montaña	Altitud de 1900 a 2200 m. Temperatura media anual de 14 °C. Precipitación anual de 2047 mm. El clima es C(fm) templado sub-húmedo con lluvias la mayor parte del año. Relieve escarpado. El suelo predominante es Andosol vítrico, profundo de texturas medias y alto contenido de materia orgánica.
Burke y Raynal, 1994	5.4 t ha <sup>-1</sup>	540	N/D	N/D	Arbutus Lake at the Huntington Wildlife Forest, Newcomb, Essex County, New York, USA	latitud 44 ° 00", longitud 74 ° 13"	Arce azucarero ( <i>Acer saccharum</i> ), Haya americana ( <i>Fagus grandifolia</i> ), Abedul amarillo ( <i>Betula alleghaniensis</i> ) y arce rojo ( <i>Acer rubrum</i> )	"Northern hardwoods" Bosque de fagus	La zona se encuentra a 530 m de elevación. El clima es húmedo, frío, con una temperatura media de -8,7 ° C en enero y 18,8 ° C en julio. Suelo de tipo franco arenoso y rocoso.
Cavelier y Estevez, 1996.	Para las raíces <2 mm 2,47 Mg ha <sup>-1</sup> . Para las raíces <5 mm en los primeros 10 cm del suelo 3,72 Mg ha <sup>-1</sup> .	309.5	N/D	N/D	La Planada, reserva privada en la vertiente occidental de los Andes de Colombia.	1°5'N; 77°24'W . La planada. Altitud de 1300-2100 m	<i>Couepia sp.</i> , <i>Cedrela sp.</i> , <i>Psidium sp.</i> , <i>Andesanthus lepidotus</i> , <i>Vismia sp.</i> , <i>Inga sp. ae.</i> , <i>Sapium sp.</i> Entre otros.	Bosque montano húmedo bajo. Bosque subandino. Bosque premonatano húmedo.	La precipitación media anual es de 3.750 mm. Temperatura media mínima de 12°C y máxima de 19°C. Suelo derivado de roca volcánica, alta cantidad de materia orgánica y un pH bajo.
de Jong, 2001.	N/D	N/D	Bosque de encino: 36 Mg ha <sup>-1</sup> . Bosque de pino-encino: 30 Mg ha <sup>-1</sup> . Bosque de pino: 25.7 Mg ha <sup>-1</sup> .	91.7	Los altos, Chiapas, México.	N/D	N/D	Bosque de pino, pino-encino, y nebliselva.	Altitud de 1500 y 2900 m. Clima templado subtropical montano. Precipitación anual de 1100 y 2000mm.

Galicia et al., 2015	19.3 Mg Ha <sup>-1</sup> .	193	N/D	N/D	Ixtlán de Juárez, Sierra Norte de Oaxaca, México.	16.5 y 18.0° N, y 95.1 y 96.9° O	Especies del género <i>Pinus</i> , <i>Quercus</i> y <i>Juniperus</i> .	Bosque templado de pino-encino.	Altitud de 1400 a 2000 m s.n.m. Precipitación de 900 mm en vertiente seca y de 1400 en vertiente húmeda. Temperatura media anual de 22 a 12 °C en la vertiente húmeda, y de 24 a 16 °C en la vertiente seca.
Girardin, et al., 2014	N/D	N/D	Esperanza: 5.56 Mg C ha <sup>-1</sup> year <sup>-1</sup> . Wayquecha 7.3 Mg C ha <sup>-1</sup> . Total: 12.86 year <sup>-1</sup>	643	Parcela "La Esperanza" y parcela Wayquecha. Parque Nacional de Manú, Cusco, Perú.	La esperanza: 13°11'25.1" S, 71°35' 49.2". Wayquecha: 13°11'25.45" S, 71°35'13.56" W.	N/D	Bosque nublado montano tropical	La esperanza 2825 m y Wayquecha 3025 m. Ubicados en el límite de la zona de bosques nublados. Suelos en ambas parcelas de tipo umbrisol, con una capa orgánica de 67 a 30 cm de profundidad. Suelos con ph e 3.6. Dosel cerrado.
Gómez, 2008.	17.8 Mg Ha <sup>-1</sup>	178	230.8 Mg C ha <sup>-1</sup>	2308	Huautla, Morelos, México.	N/D	N/D	N/D	N/D
Hertel et al., 2003	Bosque de sucesión temprana: 31 g m <sup>-2</sup> ; Bosque de sucesión media: 337 g m <sup>-2</sup> ; Bosque antiguo no perturbado: 1128 g m <sup>-2</sup> .	498.66	N/D	N/D	Cuenca alta del río Savegre de la Cordillera de Talamanca, Costa Rica.	9°34'N-9°36'N, 83°47'O-83°48'O.	Denso bosque nuboso con predominio de <i>Quercus</i> sp. Ejemplares de <i>Weinmannia pinnata</i> , <i>Oreopanax xalapensis</i> , <i>Viburnum costaricanum</i> , <i>Cornus discifora</i> , <i>Styrax argenteus</i> y <i>Cleyera theaeoides</i> .	Bosque tropical montano.	Suelos tipo andosol húmico derivados de ceniza y roca volcánica. Precipitación anual que oscila entre 2648 y 2812 mm al año. Temperatura media anual de 11°C.
Jackson et al., 1997	Biomasa raíces finas: 0.82kg	820	N/D	N/D	N/D	N/D	Bosque templado.	Bosque templado de coníferas.	ND
Leuschner et al., 2006	Valor máximo de 655 g m <sup>-2</sup> y valor mínimo de 101 g m <sup>-2</sup> . Con un promedio de 408 g m <sup>-2</sup> .	408	N/D	N/D	Pueblo de Toro, provincia de Donggala, Sulawesi central, Indonesia.	01°30' S, 120° 02' E.	Especies de 35 a 45 m de altura. Los géneros arbóreos comunes incluyen <i>Castanopsis</i> (Fagaceae), <i>Chionanthus</i> (Oleaceae), <i>Dysoxylum</i> (Meliaceae), <i>Ficus</i> (Moraceae) y <i>Lithocarpus</i> (Fagaceae).	Bosque tropical montano.	Terreno accidentado, en laderas moderadamente empinadas. Elevación de 815-1130 m s.n.m. Los suelos procedentes de rocas sedimentarias, con predominancia de cambisoles ortútricos e hipereutricos bien drenados. Gran heterogeneidad pedológica. La temperatura media anual de 24C, precipitación media anual



										de 2200 mm. Humedad del 75 % y 90%.
Masera et al., 1997	N/D	N/D	Bosque de pino: 109 T ha <sup>-1</sup> . Bosque de encino: 100 T C ha <sup>-1</sup> . Total: 209 T C ha <sup>-1</sup> .	1045	N/D	N/D	N/D	Bosque de pino y bosque de encino	N/D	
Masuahara et al., 2015	48.15 Mg Ha <sup>-1</sup>	4815	Mg C Ha <sup>-1</sup> de Suelo para 128.2	1282	Campo experimental del centro regional universitario oriente (CRUO). Huatusco, Veracruz, México.	19° 09' de latitud N y los 96° 57' de longitud O.	BMM: <i>Liquidambar straciflua</i> L. (ocozote), <i>Meliosma alba</i> (Schltld.) Walp. (quiavis), <i>Persea</i> spp., (aguacatillo), <i>Solanum muricatum</i> Aiton. (hierba mora), <i>Chamaedorea tepejilote</i> Liebm. (tepejilote), orquídeas, epífitas y (chinene), <i>Inga</i> spp. (Inga), y <i>Grevillea robusta</i> A. Cunn. (grevillea) helechos. Tratamientos: árboles del género Inga, <i>Persea schiedeana</i> Nees.	Remanente de bosque mesófilo de montaña. Fragmentos de policultivo.	1334 m de altitud, con una precipitación promedio anual de 1700,17 mm. Los suelos, en general, son de origen volcánico. El pH varía de 5.2 a 6.0 y las grandes pendientes varían de 3 a 60 %. Clima cálido-templado.	
McClagherty et al., 1982.	Arboles maduros: raíces vivas 6.1 y raíces muertas 4.4 Mg ha <sup>-1</sup> . Nuevas plantaciones: raíces vivas: 5.1 y raíces muertas: 4.0 Mg ha <sup>-1</sup> . Total: 19.6	490	N/D	N/D	Harvard Forest, Petersham, Massachusetts, USA.	N/D	<i>Quercus rubra</i> L, <i>Arce rojo</i> ( <i>Acer rubrum</i> ). Rodales de pino blanco ( <i>Pinus strobus</i> ). Abedul amarillo ( <i>Betula alleghaniensis</i> Britton). Haya americana ( <i>Fagus grandifolia</i> ).	Sucesión vegetal de Pino-encino.	Vegetación dominada por roble rojo ( <i>Quercus rubra</i> ). Suelo de origen glacial.	
Medrano-Meraz et al., 2021.	115.14 Kg	115140	57.92 Kg	57920	Bosques de Hidalgo, Puebla y Veracruz, México.	19° 46' 05"-20° 37' 8.7" N y 98° 00' 21.9"-98° 36' 29.3" O.	Dominancia de <i>P. patula</i> con asociaciones de: <i>P. greggii</i> Engelm., <i>P. maximoi</i> H. E. Moore, <i>P. pseudostrobus</i> Lindl., <i>P. teocote</i> Schiede. ex Schltld. et Cham., <i>P. leiophylla</i> Schiede ex Schltld. et Cham., <i>P. patula</i> Schiede ex Schltld. et Cham. var. <i>longipedunculata</i> Loock ex Martínez, <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltld. et Cham., <i>P. montezumae</i> Lamb., <i>P. ayacahuite</i> , y <i>Quercus</i> spp.	Bosque de pino. Bosque de encino.	Los suelos varían de moderados a muy profundos, con textura francosa en los horizontes someros y textura arcillosa en los horizontes más profundos. 2055 a 2600 m de altitud. Temperaturas mínimas e 0.9 a 7.9°C. Temperaturas máximas de 20.3 a 27.2°C. Precipitación de 1000 a 1500 mm.	
Pavón et al., 2012	Bosque con manejo: 3.05 Mg ha <sup>-1</sup> . Bosque	322	N/D	N/D	Rancho Santa Elena, Huasca de Ocampo, Sierra	20° 06' 07"-20° 09' 50" Norte y 98° 30' 04"-	<i>Pinus teocote</i> , <i>P. montezumae</i> y <i>P. patula</i> . <i>Quercus crassifolia</i> , <i>Q. laurina</i> y <i>Q. rugosa</i> .	Bosque templado. Bosque de pino-encino.	Precipitación: 837.7 mm. 2300-2700 m de altitud. Temperatura promedio anual: 13.3°C. Suelo de tipo Andosol, derivado de	

	conservado: 3.39 Mg ha <sup>-1</sup> .				de las navajas, México.	98°32' 06" Oeste.			calizas, lutitas y areniscas. Clima templado húmedo con lluvias en verano y otoño.
Quintero-Gradilla et al., 2022	Raíces <2 mm: 4.34 Mg ha <sup>-1</sup> Raíces >2 mm: 11.44 Mg ha <sup>-1</sup> . Total promedio: 7.89 Mg ha <sup>-1</sup> .	789	4.98 Mg ha <sup>-1</sup>	498	Estación científica, "Las joyas", Reserva de la biósfera Sierra de Manantlán, México.	19° 34' 14"-19° 37' 30" N y 104° 14' 49"-104° 18' 16" O.	Bosques de pino, bosques mixtos de pino-latifoliadas, bosques de pino-encino, bosques de encino, bosque mesófilo de montaña y matorrales secundarios. Hay dominancia de <i>Pinus douglasiana</i> , <i>Zinowiewia concina</i> , <i>Carpinus tropicalis</i> , <i>Symplocarpon purpusii</i> , <i>Dendropanax arboreus</i> , <i>Magnolia iltisiana</i> y <i>Cornus discifora</i> .	Bosque nublado, bosque mesófilo de montaña, bosque de pino.	Gradiente altitudinal que va de 1500 m a 2242 m s.n.m. El clima es templado subhúmedo con lluvias de verano (Ca (w2) (w)(e) g). La temperatura media anual es de 15 °C ± 0.2 °C y la precipitación de 1826 mm ± 94 mm. El sustrato geológico consiste en rocas ígneas extrusivas del Terciario (pórfido basáltico, pórfido riolítico, basalto andesítico y toba volcánica).
Rodríguez-Laguna et al., 2009	33 t ha <sup>-1</sup>	330	16.51 t C ha <sup>-1</sup>	1651	Reserva de la Biósfera El cielo, Tamaulipas, México.	22° 55' 30" y 23° 25' 50" N y 99° 05' 50" y 99° 26' 30" O.	<i>Pinus montezumae</i> , <i>P. teocote</i> , <i>P. pseudostrobus</i> , <i>Quercus germana</i> , <i>Q. xalapensis</i> , <i>Q. rysophylla</i> y <i>Juniperus flaccida</i> ; <i>Ternstroemia sylvatica</i> , <i>Prunus serotina</i> , <i>Wimmerica concolor</i> .	Bosque de pino-encino. Bosque templado.	La precipitación anual se encuentra entre 500 y 800 mm.
Rodríguez-Larramendi et al., 2016	0.42 Mg Ha <sup>-1</sup>	42	N/D	N/D	Villacorzo, Chiapas, México.	16°11'05" N y 93°16'03" O.	<i>Pinus maximinoii</i> H. E. Moore, <i>Quercus rugosa</i> Neé, <i>Quercus robur</i> L. (roble) y <i>Pinus patula Schiede ex Schltdl. et Cham.</i> (Pino ocote).	Vegetación secundaria de bosque de coníferas, mesófilo de montaña y de encino; de selva caducifolia, subcaducifolia y perennifolia.	Altitud promedio de 584 m s.n.m. Clima cálido subhúmedo con lluvias abundantes en verano. La precipitación mínima anual es de 1 200 mm y la máxima 3 000 mm
Rosado et al., 2011	Estación seca: 875 g m <sup>2</sup> . Estación húmeda: 451 g m <sup>2</sup> .	663	N/D	N/D	Parque Estatal de Serra do Mar, Sao Paulo, Brasil.	23° 31' a 23° 34' S y 45° 02' a 45° 05' O.	N/D	Selva baja, y bosque tropical montano.	Altitud de ~1000 m s.n.m. Clima tropical templado, con una precipitación media anual de 2000 mm y una alta frecuencia de niebla de alrededor de 100 días al año. A lo largo de la variación altitudinal, hay un aumento del contenido de materia orgánica, aluminio y concentración de nitrógeno y fósforo.

---

Vance y Nadkarni, 1992.	Biomasa de raíces finas: 300 g m <sup>-2</sup> (con pendiente) a 1300 g m <sup>-2</sup> (sin pendiente). Biomasa raíces total: 1600g m <sup>-2</sup> (zona con pendiente) a 7200 g m <sup>-2</sup> (en la parte no inclinada).	4400	N/D	N/D	Monteverde Cloud Forest Reserve (MVCFR). Costa Rica.	10°18'N, 84°48'O.	Plantas epífitas, briófitas, hierbas, arbustos leñosos y hemiepífitas	Bosque tropical montano.	Alta humedad, 2000 mm de precipitación anual. Los árboles de este bosque tienen altas densidades de plantas epífitas con grandes acumulaciones de materia orgánica en el dosel. Contiene humus de hasta 25 cm de espesor.
-------------------------	---	------	-----	-----	--	-------------------	---	--------------------------	---

---

N/D= No disponible