



Universidad Veracruzana

**Instituto de Investigaciones Forestales
Maestría en Ciencias en Ecología Forestal**

TESIS DE MAESTRÍA

**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**

**Presenta
Mariana Quetzalli Vizcaíno-Bravo**

**Directora Interna: Dra. Claudia Alvarez Aquino
Directora Externa: Dra. Guadalupe Williams-Linera
Asesora: Dra. Heidi Asbjornsen**

**LGAC Ecología de Ecosistemas Forestales
Noviembre, 2017. Xalapa, Veracruz**






ACTA DE VOTOS APROBATORIOS



UNIVERSIDAD VERACRUZANA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES FORESTALES
MAESTRIA EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA FORESTAL

Aprobación del documento final de tesis de grado: 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.

Realizada por el alumno Mariana Quetzalli Vizcaino-Bravo, bajo la dirección del Comité particular de tesis y aprobada por el Comité Revisor. Ha sido aceptada como requisito parcial para obtener el grado de: **Maestro en Ciencias en Ecología Forestal.**

	Nombre	Firma
Director(a) de tesis	Dra. Guadalupe Williams-Linera	
Codirector(a)	Dra. Claudia Alvarez Aquino	
Asesores	Dra. Heidi Asbjornsen	
Comisión Revisora	Dra. Rosa Amelia Pedraza	
	Dra. Patricia Gerez	
	Dra. Martha Bonilla	

Xalapa, Ver. Septiembre del 2017.

DECLARACIÓN

Excepto cuando es explícitamente indicado en el texto, el trabajo de investigación contenido en esta tesis fue efectuado por Mariana Quetzalli Vizcaíno-Bravo como estudiante de la carrera de Maestra en Ciencias entre agosto de 2015 y septiembre de 2017, bajo la supervisión de la Dra. Guadalupe Williams-Linera y la Dra. Claudia Alvarez Aquino.

Las investigaciones reportadas en esta tesis no han sido utilizadas anteriormente para obtener otros grados académicos, ni serán utilizadas para tales fines en el futuro.

Candidato: Mariana Quetzalli Vizcaíno-Bravo



Director y Co-Director de tesis: Dra. Guadalupe Williams-Linera



Dra. Claudia Alvarez Aquino



DEDICATORIA

A los bosques, particularmente a los bosques de niebla, zona donde yo nací.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Dra. Guadalupe Williams-Linera por su valioso apoyo y guía. Siempre entusiasmándome para saber más del bosque.

Agradezco al programa de posgrado del Instituto de Investigaciones Forestales (INIROF) de la Universidad Veracruzana (UV); agradezco al CONACYT por la beca otorgada para poder realizar esta maestría. Agradezco al proyecto CH2ILES y al equipo de trabajo conformado por Perla Ortiz Colín y León R. Gómez Aguilar, quienes sin su ayuda, no hubiese sido posible terminar el trabajo de campo a tiempo. Agradezco a los técnicos del Instituto de Ecología, A.C. (INECOL) Claudia Gallardo Hernández y Maryxu Peralta por su valioso e importante apoyo para la identificación de plantas; a Víctor Vázquez y Javier Tolome por su ayuda en campo y en laboratorio. También agradezco al INECOL por las instalaciones brindadas y el equipo de trabajo prestado para llevar a cabo la investigación.

Agradezco a la Dra. Heidi Asbjornsen y al Dr. Carter Z. Berry por invitarme a participar en el proyecto CH2ILES y por su valioso apoyo.

Agradezco a la Dra. Beatriz Bolívar Cimé por su apoyo en los análisis estadísticos. Agradezco a mis compañeros de maestría, en especial a Alonso Cortés-Pérez por su ayuda en campo, a Carla L. López, Naara Palestina, Abel F. Vargas, Alejandro Quirino, Diana I. Vergara y Ximena Espejel por su entusiasmo, colaboración y ayuda durante el proceso de la maestría.

Agradezco a mi familia por su apoyo brindado en este proceso.

RESUMEN

Los servicios ambientales que nos proporcionan los bosques de niebla (BN), en particular la biodiversidad y el carbono (C) almacenado en la biomasa aérea, están amenazados por perturbaciones antropogénicas y escenarios de cambio climático. El BN se caracteriza por su alta biodiversidad y gran capacidad de acumulación de C. La capacidad que tienen estos bosques y otros usos del suelo inmersos en el paisaje del BN, en particular la masa arbórea, para asimilar y almacenar grandes cantidades de C varía de acuerdo a su composición florística, biodiversidad, la cantidad de biomasa, densidad de árboles y edad del sitio. El estudio se llevó a cabo en la cuenca alta de La Antigua, en los municipios de Coatepec y Tlalnelhuayocan, en el centro del estado de Veracruz, México. El objetivo fue determinar la biodiversidad de especies arbóreas en cada uso del suelo, y cuantificar la cantidad de C aéreo almacenado en las especies dominantes. Se eligieron ocho sitios de estudio correspondientes a cuatro usos del suelo: bosque de niebla maduro, bosque de niebla secundario, y cafetal bajo sombra con dos formas de manejo, rústico y tecnificado. Siguiendo la metodología del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, se determinó la composición y riqueza de especies arbóreas en cada sitio. Se midieron variables alométricas de la vegetación (diámetro y altura de los árboles ≥ 5 cm DAP). Posteriormente, se determinó la biomasa aérea de las especies dominantes en cada sitio mediante ecuaciones alométricas y se estimó el contenido de C en la biomasa aérea de las especies arbóreas. En total, se registraron 716 individuos, pertenecientes a 88 especies y 39 familias. La biomasa aérea y el contenido de C almacenado dentro de los usos del suelo varió de 348.74 a 62.95 t/ha y de 164.32 a 30.17 t/ha, respectivamente. El bosque maduro presentó los valores más altos de biomasa aérea y de C almacenado. En promedio se estimó que el 47.52% del total de la biomasa es C almacenado. La densidad promedio de madera de las 25 especies dominantes fue de 0.494 g/cm^3 . Los resultados permitirán entender mejor cómo diferentes usos del suelo ayudan a mitigar la degradación del BN y a mantener los servicios ecosistémicos a nivel de cuenca, principalmente la conservación de la biodiversidad y el almacenamiento de C.

Palabras clave: almacén de carbono, árboles, biomasa aérea, cuenca, deforestación.

ABSTRACT

Ecosystem services provided by tropical montane cloud forests (TMCF), in particular biodiversity and carbon (C) storage in the aboveground biomass, are threatened by anthropogenic disturbance and climate change. The TMCF is characterized by high biodiversity and high C storage capacity. The ability of these forests and other land uses immersed in the landscape, in particular the tree biomass, to assimilate and store large amounts of C varies according to floristic composition, biodiversity, amount of biomass, tree density and site age. This study was carried out in the La Antigua basin, in the municipalities of Coatepec and Tlalnelhuayocan, central Veracruz, Mexico. The objective was to determine the biodiversity of tree species in each land use, and to quantify the amount of aerial C stored in the dominant tree species. Eight study sites corresponding to four land uses were selected: mature forest, secondary forest, and shade coffee plantation with two forms of management, rustic and technified. Following the technic proposed by the National Forestry and Soils Inventory, tree species composition and richness were determined at each site. Allometric variables of the vegetation (diameter and height of trees > 5 cm dbh) were measured. Subsequently, aboveground biomass of the dominant tree species at each site was determined using allometric equations and then C content in the biomass was estimated. In total, 716 individuals belonging to 88 species and 39 families were recorded. Aboveground biomass and C content stored in land uses ranged from 348.74 to 62.95 t/ha and from 164.32 to 30.17 t/ha, respectively. Mature forest presented the highest values of biomass and stored C. On average, it was estimated that 47.52% of the biomass is C stored. Mean wood density of the 25 dominant tree species is 0.494 g/cm³. The results will allow a better understanding of how different land uses contribute to mitigate TMCF degradation and maintain ecosystem services at a basin level, mainly biodiversity conservation and C storage.

Key words: aboveground biomass, carbon storage, deforestation, trees, watershade.

ÍNDICE

Acta de votos aprobatorios.....	I
Declaración.....	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	3
3. HIPÓTESIS.....	9
4. OBJETIVO GENERAL.....	9
4.1 Objetivos particulares.....	9
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
5.1 Área de estudio.....	10
5.2 Diseño experimental.....	12
5.2.1 Muestreo en campo.....	12
5.2.2 Biodiversidad arbórea: composición florística, riqueza y diversidad.....	13
5.2.3 Biomasa aérea y carbono almacenado.....	14
5.3 Análisis estadístico.....	16
6. RESULTADOS.....	17
6.1 Muestreo de la vegetación.....	17
6.1.1 Estructura de la vegetación.....	17
6.1.2 Composición de especies.....	20
6.1.3 Biodiversidad arbórea.....	23
6.2 Densidad de madera.....	24
6.3 Biomasa aérea y contenido de carbono almacenado en la biomasa.....	26
7. DISCUSIÓN.....	29
7.1 Usos del suelo.....	29
7.2 Servicios ecosistémicos.....	30
7.3 Estructura de la vegetación.....	31
7.4 Composición florística.....	32

7.5 Biomasa aérea.....	33
7.6 Densidad de la madera.....	34
7.7 Contenido de carbono.....	35
8. CONCLUSIONES.....	37
9. LITERATURA CITADA.....	38
10. ANEXOS.....	47

1. INTRODUCCIÓN

Ante los escenarios de deforestación y cambio climático, cada vez es más importante conocer los servicios ecosistémicos que nos proporcionan los bosques, tales como la biodiversidad y el contenido de carbono (C) almacenado en la biomasa (García-De la Cruz *et al.*, 2013). La perturbación antropogénica, principalmente la deforestación, es una de las mayores causas de pérdida de los bosques tropicales (Gibbs *et al.*, 2007). Dada esta perturbación, la cual causa grandes cambios en la vegetación original, es necesario estudiar a los bosques y los diferentes usos del suelo a los que han sido transformados. A este paisaje de bosque fragmentado con diversos usos del suelo se le considera un gran almacén de C el cual se encuentra bajo amenaza, lo que podría causar problemas ambientales (Pineda-López *et al.*, 2005; Williams-Linera *et al.*, 2002).

Los bosques de niebla (BN) o bosques mesófilos de montaña (BMM) son generalmente definidos como bosques que frecuentemente están cubiertos por nubes o neblina y representa alrededor del 2.5% de los bosques tropicales del mundo (Gibbon *et al.*, 2010). Además, se ha descrito que estos ecosistemas “exhiben gran diversidad natural en composición de especies y en estructura de la vegetación debido a la gran variedad de hábitats que lo conforman y al cambio notable en la composición de especies arbóreas de un sitio a otro” (Williams-Linera *et al.*, 2002). A pesar de la gran heterogeneidad que conforma este tipo de vegetación (García-Franco, 2008; Williams-Linera *et al.*; 2013), algunos BN en el Este de México se caracterizan por presentar una composición de especies de dosel con predominancia de árboles caducifolios de clima templado, por ejemplo liquidámbar (*Liquidambar*), encinos (*Quercus*) y hayas (*Platanus*), pero también árboles perennifolios como las magnolias (*Magnolia*), y otras especies como *Clethra*, *Persea*, *Turpinia*, *Symplocos* y *Trichilia*. Mientras que el sotobosque está conformado principalmente por especies tropicales perennifolias, por ejemplo, *Cinnamomum*, *Eugenia*, *Miconia* y *Palicourea* (Alcántara-Ayala y Luna-Vega, 1997; Williams-Linera, 2002; Williams-Linera *et al.*, 2013).

En México, el BN es el tipo de vegetación más diverso por unidad de área, el cual a pesar de abarcar menos de 1% de la superficie terrestre contribuye con alrededor del 10 al 12% a la diversidad vegetal y tiene un alto porcentaje de endemismo

(Rzedowski, 1996). Se ha estimado que de un total de 762 especies arbóreas que prosperan en estos tipos de bosques, 60% están en alguna categoría de amenaza: el 10% están casi amenazadas y 28% son de menor preocupación, de acuerdo con los criterios de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (González-Espinosa *et al.*, 2012).

Históricamente las interacciones ocurridas entre las actividades humanas y el ambiente han resultado en diferentes procesos de perturbación, fragmentación y degradación de hábitats (Cuevas-Reyes, 2010; Williams-Linera *et al.*, 1996), por lo que actualmente la cobertura de la masa forestal se encuentra presente en fragmentos rodeados por diversos usos del suelo como la ganadería y la agricultura, principalmente (Gerez, 2013; Williams-Linera *et al.*, 2002). Debido a esta fragmentación y otras fuentes de contaminación como las emitidas por la quema de combustibles fósiles, uno de los temas de mayor preocupación es el incremento de la contaminación atmosférica, ocasionando un aumento en los gases que producen el efecto invernadero (GEI). Algunos de estos gases emitidos a la atmósfera son metano (CH₄), ozono (O₃), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de azufre (SO₂) (Garduño, 2004; Rodríguez *et al.*, 2006), los cuales se encuentran en proporciones menores en comparación con el dióxido de carbono (CO₂). La alta emisión de CO₂ es una de las principales causas de contaminación atmosférica, lo que provoca desequilibrios ecológicos relacionados con el cambio climático (Acosta-Mireles *et al.*, 2011).

A nivel mundial, los bosques tienen una gran importancia ecológica debido a que se consideran medios para mitigar el fenómeno producido por los GEI, ya que en ellos se realiza un intercambio de gases donde por medio de la fotosíntesis, se libera oxígeno (O₂) a la atmósfera y se captura CO₂. Este compuesto es transformado en biomasa de la vegetación dándole crecimiento y, de esta manera, se almacena el C en los diferentes componentes vegetativos (raíces, tronco, ramas, hojas) y en los diferentes estratos (dosel, sotobosque, arbustivo, herbáceo; Acosta-Mireles *et al.*, 2011; Gayoso y Guerra, 2005; Hall *et al.*, 2015; Schlegel *et al.*, 2001).

Como ya se mencionó, la fragmentación de los bosques ocurre principalmente por la deforestación ocasionado cambios en la vegetación original, estos cambios llevan a la pérdida de valiosos servicios ecosistémicos como la provisión de agua, la

conservación de la biodiversidad y de los suelos, entre otros (Balvanera *et al.*, 2015; Williams-Linera *et al.*, 2002). Sin embargo, estos bosques, al igual que otros tipos de vegetación, continúan siendo reducidos drásticamente principalmente por el cambio de uso del suelo. INEGI (2008) reporta que la superficie de BN en el país, en diez años, se ha reducido del 1% a tan solo el 0.48%, cifra alarmante al considerar todos los servicios ecosistémicos que proporciona. Debido a esta pérdida de la vegetación original es importante considerar, en investigaciones desarrolladas dentro de una cuenca, a los bosques y a otros usos del suelo que los rodean para de esta manera, tener estudios más integrales del paisaje, obteniendo resultados más certeros.

Incluir en las investigaciones el ciclo de C a nivel de los ecosistemas es relevante, debido a las altas tasas de deforestación de la cobertura arbórea. El actual deterioro ocurrido en los bosques está causando grandes problemas ambientales al interrumpir el ciclo natural del C. En particular, el BN se considera un tipo de vegetación con una gran capacidad de almacenamiento de C, por su alta heterogeneidad que lo conforma. Esto, debido principalmente, a que la gran diversidad de especies que alberga influye en las cantidades de C almacenado (Acosta-Mireles *et al.*, 2002), por lo que la destrucción de este bosque, implica la emisión de altas cantidades de CO₂ a la atmósfera (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2013).

Para entender mejor el papel que juegan los bosques, en particular el BN, dentro del ciclo natural del C y mitigarlo, es necesario por un lado, conocer la biodiversidad de este tipo de vegetación y los diversos usos del suelo que lo rodean y por otro, conocer el almacén de C que se encuentra en la biomasa aérea. Por tal motivo, el propósito de esta investigación es conocer la biodiversidad en la cobertura aérea de la vegetación arbórea y cuantificar la cantidad de C almacenado en la biomasa aérea del BN ubicado en la cuenca alta de La Antigua, dentro de los municipios de Coatepec y Tlalnelhuayocan, en el centro del estado de Veracruz, México.

2. ANTECEDENTES

Debido a la posición geográfica en la que se encuentra México, presenta una gran diversidad de tipos de vegetación. El BN es uno de los más importantes ya que en un

espacio menor al 1% de la superficie total del país presenta una alta biodiversidad. Por la característica que presenta el BN de alta humedad y temperaturas favorables es que pueden coexistir gran diversidad de especies que alberga este tipo de vegetación. En general, el BN se caracteriza por presentar una flora de origen templado (septentrional) en el estrato arbóreo, y neotropical (meridional) en el sotobosque, además que cuenta con muchas especies endémicas de estos bosques (Rzedowski, 1996). El BN presenta un interés ecológico particular debido a los servicios ecosistémicos que proporciona, entre estos destacan los servicios hidrológicos, la biodiversidad y la captura de CO₂ (Asbjornsen y Manson, 2015; Hall *et al.*, 2015; Williams-Linera *et al.*, 2002).

Los servicios que nos proporcionan los ecosistemas (servicios ecosistémicos) son todos aquellos beneficios (tangibles e intangibles) que recibe la sociedad para mantenerse. Estos se catalogan en cuatro rubros: servicios de provisión (alimento, agua), servicios de regulación (regulación climática, degradación del suelo), servicios de base (formación del suelo, ciclos de los nutrientes) y servicios culturales (recreación, paisaje; Asbjornsen y Manson, 2015; Caballero, 2014; Costanza *et al.*, 1997; MEA, 2005). La deforestación afecta los servicios ecosistémicos que obtenemos; parte de esta deforestación es la degradación de la cobertura arbórea, la cual conducen a una pérdida casi desapercibida de la biodiversidad (Gerez, 2013). Esta pérdida tiene consecuencias negativas para el ambiente y también afecta directamente a la salud humana. Recientemente se ha encontrado evidencia del efecto negativo para el humano por la pérdida de la biodiversidad, al encontrarse más directamente en contacto con los patógenos potenciales de transmisión de enfermedades (Hall *et al.*, 2015; Keesing *et al.*, 2015).

El cambio de uso del suelo de los bosques, principalmente por la deforestación y la lenta pérdida de la biomasa (degradación), ha ocasionado severas transformaciones en sus condiciones y en la capacidad de estos para proveer servicios ecosistémicos vitales para los seres humanos (Asbjornsen y Manson, 2015). Algunas consecuencias provocadas por el cambio de uso del suelo son: mayores emisiones a la atmósfera de GEI (principalmente CO₂), aumento en las temperaturas, reducción del abasto hídrico y pérdida de la biodiversidad (Hall *et al.*, 2015).

El ciclo natural (biogeoquímico) del C ocurre de manera constante, dentro del cual, el C circula entre la materia orgánica y el ambiente físico-químico. En este, por medio de la fotosíntesis, se lleva a cabo un intercambio de C entre la biósfera (tierra), hidrósfera (ríos, lagos, océanos), litósfera (corteza terrestre) y atmósfera, a diferentes escalas espacio-temporal. Este ciclo global es muy importante ya que ayuda a regular la temperatura del planeta debido a que, por medio de este ciclo natural se nivelan las concentraciones de gases de CO₂ en la atmósfera, lo que evita el aumento de la temperatura (Jaramillo, 2004). Actualmente, el ciclo natural del C es interrumpido por actividades antropogénicas, principalmente las causadas por la deforestación para el cambio de uso del suelo, provocando desequilibrios ecológicos (Hall *et al.*, 2015).

La biomasa presente en los bosques representa un almacén de C el cual es fijado por las plantas a través de la fotosíntesis, donde se lleva a cabo un intercambio de gases entre las plantas y la atmósfera por medio de la respiración (Jaramillo, 2004). Por lo anterior, se deben considerar los grandes paisajes de masa forestal con presencia de diversos usos del suelo, prioridad para la conservación ya que, el C se encuentra relacionado con los más graves problemas ambientales que hoy afectan al planeta. Esto debido a que, desde la era industrial, las concentraciones de CO₂ y otros gases en la atmósfera han ido aumentando considerablemente, acelerando el calentamiento de la tierra provocando el cambio climático (Acosta-Mireles *et al.*, 2001; Jaramillo, 2004).

La capacidad que tienen los bosques, en particular la masa forestal arbórea de asimilar y almacenar grandes cantidades de C en forma de biomasa varía y se ve influenciada principalmente por la composición florística, la edad de las plantas, la densidad poblacional, el tejido del árbol, el tipo de suelo y la calidad del sitio (Acosta-Mireles, 2003; Acosta-Mireles *et al.*, 2002; 2011; Álvarez-Dávila *et al.*, 2017; Gayoso y Guerra, 2005; Magaña *et al.*, 2004; Martin y Thomas, 2011; Polzot, 2004; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2006; Schlegel *et al.*, 2001). El C se encuentra almacenado en forma de biomasa viva dentro del bosque y los distintos usos del suelo (Acosta-Mireles *et al.*, 2002, Ortiz-Ceballos *et al.*, 2004; Pineda-López *et al.*, 2005). Dado lo anterior, es importante mantener los ecosistemas forestales conservados así como otros usos del

suelo que los rodean, tales como bosques secundarios (Guariguata y Ostertag, 2002) y cafetales bajo sombra (López-Gómez, 2004; Moguel y Toledo, 1999).

En general, se considera que los bosques tropicales montanos almacenan grandes cantidades de C en la biomasa (Chave *et al.*, 2005; Gibbs *et al.*, 2007; Hall *et al.*, 2015). En particular, el BN se considera un almacén de C de gran magnitud debido a que, los cambios en su composición estructural y florística pueden incidir en los contenidos de C almacenado, al igual que la abundante humedad (Álvarez-Dávila *et al.*, 2017). De esta forma, el BN es uno de los ecosistemas de mayor acumulación de C por unidad de superficie en el país (Acosta-Mireles *et al.*, 2011; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2013). Por ello, es importante mantener conservado el paisaje de BN ya que, ayuda a mitigar el problema del cambio climático mediante la asimilación y almacenamiento de C en sus estructuras y en los diferentes componentes vegetativos (Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Hall *et al.*, 2015; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2008).

A pesar de que el 90% de los bosques nublados tropicales montanos se encuentran dentro de las 200 Ecoregiones Prioritarias Mundiales para la acción de conservación por los importantes servicios ecosistémicos que proporcionan (Aldrich *et al.*, 2000), los bosques tropicales tienen un proceso acelerado en la transformación y cambio de uso del suelo. El avance de la frontera agropecuaria, entre otros, provoca que ecosistemas forestales con gran cantidad de C almacenado en la biomasa, se transformen en ecosistemas con bajos niveles de C como pastizales y áreas cultivadas (FAO, 2000; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2009). Sin embargo, en sistemas agroforestales como los cafetales bajo sombra diversificada, los niveles de C almacenado en bosques pueden permanecer, por lo que constituyen una alternativa para disminuir este fenómeno y favorecer la conservación de la biodiversidad y otros servicios (López-Gómez, 2004; Pineda-López *et al.*, 2005). También se ha documentado que existen cambios en el almacén de C en sitios de plantaciones o sucesión secundaria, debido a que las plantaciones jóvenes tienen una mayor tasa de crecimiento que los bosques maduros, por lo que la cantidad de captura de C en estos sitios es mayor (Gibbon *et al.*, 2010). Sin embargo, no se compara con la cantidad de C que ya se encuentra almacenado en los bosques maduros, evitando así que se disperse en la atmósfera.

Generalmente, un método confiable para estimar el contenido de C almacenado en la biomasa aérea forestal es utilizar modelos alométricos estimados para cada especie mediante métodos destructivos en los cuales se pesa todo el árbol (Acosta-Mireles *et al.*, 2002). Estos modelos se basan en ecuaciones alométricas, las cuales han sido desarrolladas para bosques tropicales en Centroamérica, Sudamérica, Sudáfrica y Asia (Chave *et al.*, 2005; Gibbs *et al.*, 2007). Sin embargo, la información reportada para BN sobre las ecuaciones alométricas necesarias para determinar la capacidad que tienen de almacenar el C en su componente aéreo es muy limitada. Debido a la alta complejidad y la gran heterogeneidad de estos bosques aún hacen falta estudios que brinden esta información (Acosta-Mireles *et al.*, 2001; Álvarez-Arteaga *et al.*, 2013; Gibbs *et al.*, 2007).

A nivel mundial, para los bosques tropicales húmedos se reporta que el C almacenado representa un valor del 47.3% de su biomasa total (Martin y Thomas, 2011). En bosques húmedos de Costa Rica, Polzot (2004) reporta una biomasa de 394.2 t/ha y un contenido de C de 197.1 t/ha. Para los bosques tropicales de México se reporta una variación de C almacenado de 27.5 a 117.0 t/ha (Campo *et al.*, 2016). Mientras que en bosques montanos de la Sierra Norte de Oaxaca reportan una variación que va de 220.9 a 306.7 t/ha y de 24.7 a 93.2 t/ha de biomasa y C, respectivamente (Álvarez-Arteaga *et al.*, 2013; Etchevers *et al.*, 2001).

A pesar de que aún no se ha llevado a cabo un estudio integrado que cuantifique el contenido de C de los BN, se utiliza el criterio de la biomasa aérea (tronco y ramas) para determinar el contenido de C almacenado. Este criterio de estratificación es el más apropiado debido a que en la biomasa aérea es donde se encuentra la mayor cantidad de C almacenado en los bosques (Gayos y Guerra, 2005; Gibbon *et al.*, 2010). Otras mediciones que se han utilizado incluyen la determinación del contenido de C en la biomasa radicular, sin embargo este compartimento no se consideró en el presente estudio.

Para estimar el contenido de C se requieren métodos confiables de medición de biomasa-carbono ya que se sabe que están directamente relacionados (Álvarez-Dávila *et al.*, 2017). Los inventarios forestales se utilizan para estimar el C fijado. Este se basa en principios y procedimientos aceptados por el Panel Intergubernamental de Cambio

Climático (IPCC, 2001) para lo cual se miden las variables alométricas de diámetro a la altura de 1.30 m (DAP) y la altura total de los árboles; estos datos son posteriormente utilizados en ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea (Chave *et al.*, 2005; Soriano-Luna *et al.*, 2015). La estimación de la biomasa aérea de los individuos se ha afinado incluyendo además, en las ecuaciones alométricas, los valores obtenidos de la densidad de la madera. La densidad se obtiene de virutas (muestra de madera) de las especies dominantes, esto con el fin de obtener datos más precisos del contenido de C almacenado por especie dentro del BN (Chave *et al.*, 2005; Gilroy *et al.*, 2014; Ordóñez *et al.*, 2015; Soriano-Luna *et al.*, 2015). De hecho, en un metaanálisis para BMM de México, se ha reportado que la densidad de la madera varía notablemente de acuerdo al tipo de vegetación y la especie (Ordóñez *et al.*, 2015). Dado lo anterior, es importante analizar específicamente la densidad de la madera arbórea dentro de diferentes usos del suelo, e incluso dentro de una misma especie.

Particularmente, en la cuenca alta de La Antigua en el centro del estado de Veracruz, los usos del suelo seleccionados en el presente estudio representan aquellos ya estudiados por diversos autores (Gerez, 2013; Muñiz, 2012; Pineda-López *et al.*, 2005; Williams-Linera, 2007). Estos estudios clasifican a los usos del suelo dentro del BN en vegetación secundaria, cafetales de sombra, cultivo de milpa (maíz, frijol, calabaza), plantaciones de especies maderables y pastizales (entre otros. Espinoza-Domínguez *et al.* 2012). Debido a que en la zona se encuentran diferentes usos del suelo, para esta investigación se seleccionaron sitios dentro de un gradiente de intensificación de uso del suelo, los cuales se encuentran asociados al manejo de la región; esto con el fin de obtener valores más representativos dentro del paisaje en la cuenca.

Esta tesis se desarrolló dentro del marco del proyecto “*Experimental Frameworks for Evaluating Net Effects of Hydrologic Service Payments on Coupled Social-Ecological Systems*” (CH2ILES) (Marcos Experimentales para Evaluar los Efectos del Pago por Servicios Hidrológicos en Sistemas Social-Ecología Acoplados) financiado por *National Science Foundation* (NSF). El proyecto pretende obtener fundamentos científicos para mejorar el pago por servicios ambientales en ocho microcuencas hidrológicas y cinco usos del suelo en el centro de Veracruz, México. El

estudio es multidisciplinario e involucra la interacción entre aspectos ambientales, sociales, económicos, políticos y geográficos. La presente investigación busca determinar ¿cuál es la cantidad de carbono aéreo almacenado en la biodiversidad de la vegetación arbórea en cuatro usos del suelo dentro del BN, ubicado en la cuenca alta de La Antigua en los municipios de Coatepec y Tlalnelhuayocan, en el centro del estado de Veracruz, México?

3. HIPÓTESIS

El contenido de carbono asociado a la biomasa aérea está relacionado directamente con la biodiversidad de especies arbóreas por lo que cambiará dentro de los diversos usos del suelo.

4. OBJETIVO GENERAL

Determinar la biodiversidad arbórea, la biomasa aérea y el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea, en un gradiente de intensificación de usos del suelo que va de bosque maduro a bosque secundario, cafetal bajo sombra con manejo rustico y cafetal bajo sombra con manejo tecnificado, inmersos en el bosque de niebla de la cuenca alta de La Antigua, municipios de Coatepec y Tlalnelhuayocan, en el centro de Veracruz, México.

4.1 Objetivos particulares

- Determinar la biodiversidad arbórea en cuatro tipos de usos del suelo en la región del bosque de niebla en la cuenca alta de La Antigua, en el centro del estado de Veracruz.
- Determinar la biomasa aérea de las especies arbóreas dominantes en cuatro tipos de usos del suelo en la región del bosque de niebla en la cuenca alta de La Antigua, en el centro del estado de Veracruz.

- Cuantificar y comparar el contenido de carbono aéreo que se encuentra almacenado en la cobertura forestal en cuatro tipos de usos del suelo, ubicados en la región del bosque de niebla en la cuenca alta de La Antigua, en el centro del estado de Veracruz.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro del Eje Neovolcánico, en las laderas del volcán Cofre de Perote, en el centro del estado de Veracruz, en un rango altitudinal entre los 1,230 a 1,745 msnm. El clima es templado húmedo con tres estaciones: la relativamente seca y fría entre noviembre y marzo, la relativamente seca y cálida de abril a mayo, y la húmeda-cálida de junio a octubre. La variación en temperatura oscila entre los 12 y 18° C y la precipitación anual va de 1,200 a 1,700 mm (Williams-Linera, 2002; Williams-Linera *et al.*, 2013).

El tipo de vegetación original es BN, sin embargo, actualmente se encuentra reducido a fragmentos aislados rodeados por cafetales, acahuales (vegetación secundaria), potreros, agricultura y asentamientos humanos (Gerez, 2013; Williams-Linera *et al.*, 1996, 2002). Los suelos de la zona, de acuerdo a las cartas geológicas elaboradas por INEGI (2010), son predominantemente de origen volcánico, andosoles franco-arcillosos con presencia de abundante materia orgánica y son suelos profundos (González-Espinosa *et al.*, 2012).

Los sitios de estudio se encuentran dentro de la cuenca alta de La Antigua en los municipios de Coatepec y Tlalnelhuayocan, en la ladera barlovento del Cofre de Perote en el centro del estado de Veracruz. Parte de esta zona corresponde a la Región Terrestre Prioritaria para zonas de alto valor ecosistémico (CONABIO, 2010; Vidriales *et al.*, 2012). En esta área de estudio se seleccionaron ocho sitios representando cuatro usos del suelo: bosque de niebla maduro (bosques bien conservados con escasa intervención humana), bosque de niebla secundario (bosques relativamente jóvenes con escasa o poca intervención humana y con ciertos años de abandono) y cafetal bajo

sombra dividido en dos categorías de acuerdo a su manejo, cafetal rústico (orgánico) y tecnificado (uso de químicos y podas constantes. Figura 1).

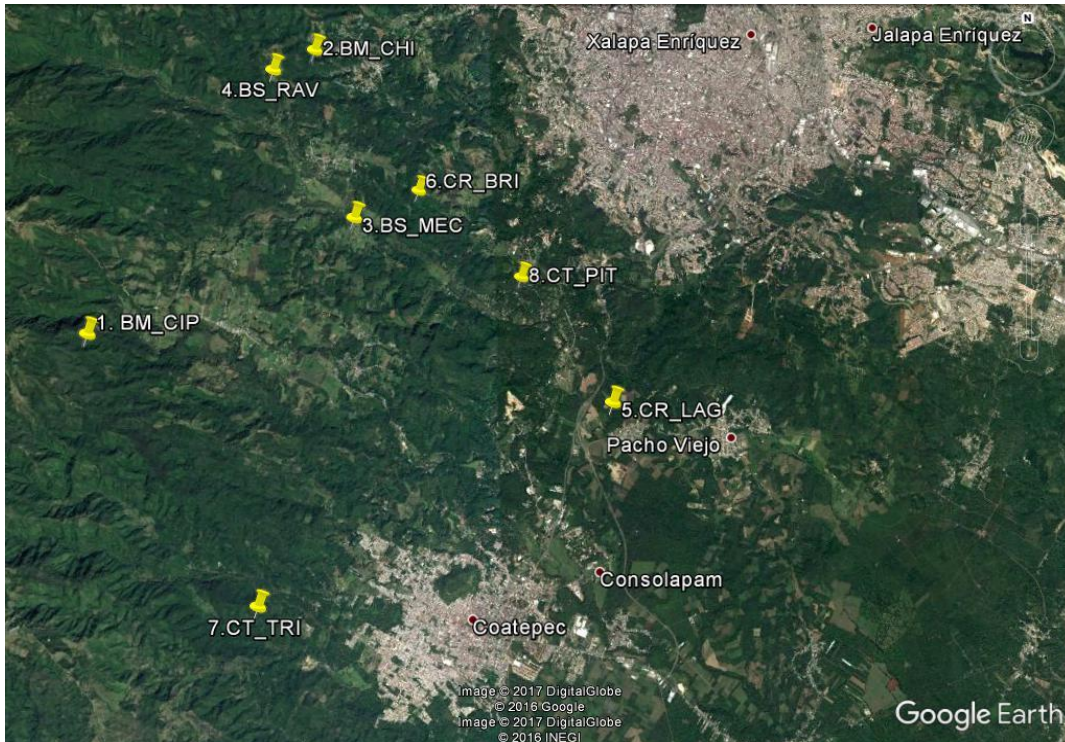


Figura 1. Imagen de la ubicación de los ocho sitios de estudio: 1.BM_CIP: bosque de niebla maduro Cinco Palos; 2.BM_CHI: bosque de niebla maduro Chivizcoyo; 3.BS_MEC: bosque de niebla secundario Mesa Chica; 4.BS_RAV: bosque de niebla secundario Rancho Viejo; 5.CR_LAG: cafetal bajo sombra con manejo rústico La Laguna; 6.CR_BRI: cafetal bajo sombra con manejo rústico Briones; 7.CT_TRI: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado Trianon; 8.CT_PIT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado La Pitaya. Google Earth (Fecha de consulta: 25 de enero de 2016).

Para elegir los sitios de estudio se tomó en cuenta que la zona, delimitada por la microcuenca, representara al menos el 80% de cobertura de uso del suelo deseado. Los sitios de estudio tienen una precipitación media anual de 1,609 mm, una temperatura media anual de 18.8° C (CONAGUA, 2013) y presentan un suelo de tipo andosol con textura media (INEGI, 2010). Se encuentran entre la ciudad de Xalapa y Coatepec, en las cercanías de las comunidades de Cinco Palos, Mesa Chica, Rancho Viejo, La Laguna, Briones y La Pitaya (Cuadro 1).

Cuadro 1. Sitios de estudio localizados en la cuenca alta de La Antigua en los municipios de Coatepec y Tlalnelhuayocan en el centro del estado de Veracruz, México. Número del sitio, clave, nombre de la comunidad más cercana al sitio, altitud, precipitación media anual (Pp), temperatura media anual (T) y uso del suelo.

No.	Clave	Sitio	Altitud (msnm)	Pp (mm)	T (°C)	Uso del suelo
1	BM_CIP	Cinco Palos	1,743.8	1,687	17.1	Bosque maduro
2	BM_CHI	Chivizcoyo	1,614.8	1,625	17.8	
3	BS_MEC	Mesa Chica	1,431.3	1,590	18.9	Bosque secundario
4	BS_RAV	Rancho Viejo	1,522.3	1,534	18.4	
5	CR_LAG	La Laguna	1,235.0	1,584	19.9	Cafetal rústico
6	CR_BRI	Briones	1,441.8	1,538	18.8	
7	CT_TRI	Trianon	1,271.0	1,758	19.8	Cafetal tecnificado
8	CT_PIT	La Pitaya	1,334.5	1,554	19.4	

5.2 Diseño experimental

5.2.1 Muestreo en campo

El muestreo se llevó a cabo con base en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2009). En cada sitio de estudio se estableció al azar una parcela circular de 56.42 m de radio (10,000 m²; ver Figura 2), dentro de la cual se colocaron cuatro rodales con un radio de 11.28 m (1,600 m² en total por sitio), distribuidos en forma de Y invertida, ajustado a la disponibilidad del terreno. El primer rodal se marcó en el centro de la parcela, el segundo rumbo al norte (N-0°) a una distancia de 45.14 m entre centro y centro de cada rodal, el tercero se colocó con rumbo al sureste (SE-120°) y el cuarto rumbo al suroeste (SO-240°), ambos a la misma distancia de separación que el primero (CONAFOR, 2009; Figura 2). Para los sitios que presentaron una inclinación mayor del 10% de pendiente, se corrigió la distancia horizontal del rodal utilizando una tabla de correcciones (Schlegel *et al.*, 2001; Anexo 1).

Dentro de cada rodal (400 m²), iniciando en el centro de la parcela (sitio 1), se midieron todos los árboles con un diámetro a la altura del pecho (1.30m, DAP) \geq 5 cm comenzando hacia la orientación norte y siguiendo las manecillas del reloj (CONAFOR, 2009). Cada individuo se enumeró, etiquetó, identificó y se midió la altura total con un clisímetro. Los árboles que se encontraron en los límites del rodal, se tomaron en

cuenta si más de la mitad de su tronco se encontraba dentro del círculo (Schlegel *et al.*, 2001).

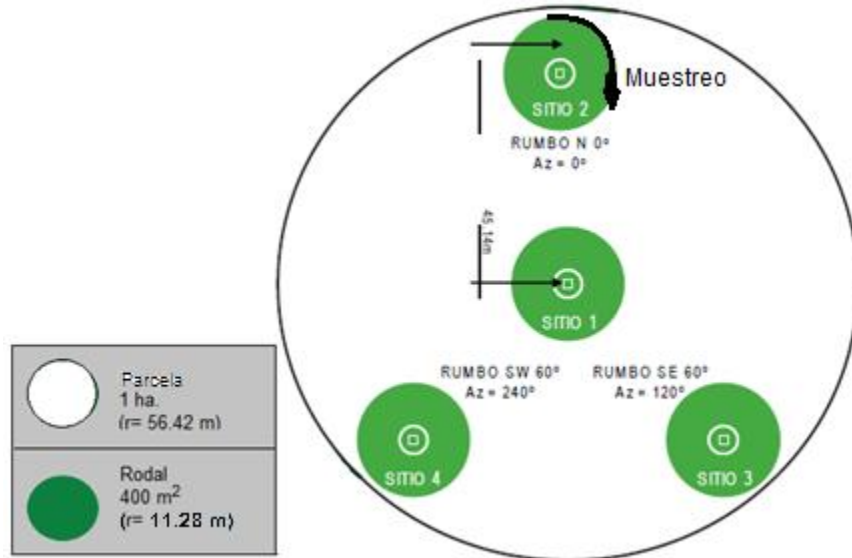


Figura 2. Distribución de los rodales de muestreo dentro de la parcela para cada sitio de estudio (CONAFOR, 2009).

Para cada especie que no fue posible identificar *in situ* se colectaron ejemplares para su posterior identificación con ayuda de especialistas del herbario XAL del Instituto de Ecología, A.C. (INECOL) de Xalapa, Veracruz.

5.2.2 Biodiversidad arbórea: Composición florística, riqueza y diversidad

En cada sitio y en cada uso del suelo se calculó la altura promedio, la altura máxima promedio, el área basal (AB), la densidad de individuos por hectárea y el índice de valor de importancia de Curtis (IVI) para lo cual se empleó la siguiente fórmula (Muller-Dombois y Ellenberg, 1974):

$$IVI = \frac{\text{densidad relativa} + \text{frecuencia relativa} + \text{dominancia relativa}}{3}$$

Dónde:

$$\text{Densidad relativa} = \frac{\text{número de individuos de la especie A}}{\text{número total de individuos}} \times 100$$

$$\text{Frecuencia relativa} = \frac{\text{frecuencia de la especie A}}{\Sigma \text{ de frecuencias del total de especies}} \times 100$$

$$\text{Dominancia relativa} = \frac{\text{área basal de la especie A}}{\Sigma \text{ de área basal del total de especies}} \times 100$$

Para cada uso del suelo se calculó la riqueza (número de especies), y la diversidad mediante el índice de Shannon Wiener (H'), utilizando la siguiente fórmula:

$$H' = -\sum p_i \log p_i$$

Dónde:

$$p_i = n_i/N$$

$$N = \sum n_i$$

n_i = representa la abundancia de la especie i

5.2.3 Biomasa aérea y carbono almacenado

Para elegir a las especies dominantes en cada uso del suelo se propone que las especies que alcanzan más del 10% del área basal total de la comunidad se pueden considerar como dominantes (Williams-Linera *et al.*, 1996). Debido a que el bosque de niebla es muy heterogéneo, en el presente estudio se consideró el 80% de la dominancia relativa para seleccionar las especies más representativas de la comunidad. A estas especies se les determinó el contenido de carbono aéreo mediante dos etapas: I) en la primera se determinó la biomasa aérea en los cuatro usos del suelo (bosque maduro, bosque secundario, cafetal bajo sombra con manejo rústico y cafetal bajo sombra con manejo tecnificado). II) En la segunda se calculó el contenido de C de la biomasa aérea determinada en la primera etapa.

i) Biomasa aérea

Para determinar la biomasa aérea se utilizó un método no destructivo basado en variables alométricas de fácil medición: DAP y altura total. Además se incluyó la densidad de la madera y el contenido de C (analizado en laboratorio) de las especies dominantes, al considerar que de esta forma se obtiene un dato más preciso (Chave *et al.*, 2005). Este método comprende un diseño de muestreo sistemático dentro de los 32 rodales (12,800 m²) ubicados en las ocho parcelas de todos los sitio de estudio. En la literatura se encuentran disponibles ecuaciones para varias especies que se pueden ajustar para estimar tanto la cantidad de biomasa como el contenido de C por árboles individuales o por especie (Acosta-Mireles *et al.*, 2001; Schlegel *et al.*, 2001). En el

presente trabajo, a partir de las mediciones obtenidas, se utilizó la ecuación alométrica para estimar la biomasa aérea propuesta por Chave *et al.* (2005) para bosques húmedos, la cual se basa en el método destructivo empleado para 2,410 árboles en 27 sitios:

$$(AGB)_{est} = \exp(-2.557 + 0.940 \times \ln(\rho D^2 H)) \\ \equiv 0.0776 \times (\rho D^2 H)^{0.940}$$

Donde:

(AGB)_{est} = biomasa aérea
 ρ = densidad específica de la madera
 D = DAP
 H = altura total
 \equiv Identidad matemática (ambas fórmulas se pueden utilizar para estimar la biomasa)

Para determinar la densidad de la madera se obtuvo una muestra de viruta, con ayuda de un taladro Pressler, por especie identificada como dominante de cada sitio de estudio (cuatro réplicas por especie) y así obtener la densidad específica de la madera. La muestra fue tomada del fuste de los individuos seleccionados a una altura de 1.30 m. A las muestras se les midió el diámetro con un vernier digital (Mitutoyo 05012180), el largo con una regla graduada y se colocaron en un horno de secado (Lumistell^{MR}, HTP-72) durante 72 horas a una temperatura de 65° C para obtener su peso seco (Chave *et al.*, 2005; Gilroy *et al.*, 2014; Ordóñez *et al.*, 2015). La densidad de la madera de las especies dominantes, se obtuvo aplicando la fórmula de peso seco entre volumen fresco para cada muestra:

$$WD = \frac{Ps}{Vf}$$

Donde:

WD = densidad de la madera
 Ps = peso seco
 Vf = volumen fresco

Para las especies no dominantes, la densidad de la madera se obtuvo de la base de datos Global Wood Density (Zanne *et al.*, 2009).

ii) Carbono en la biomasa aérea

Para obtener el C estimado (C_{est}) se empleó la fórmula propuesta por Chave *et al.* (2005). El resultado obtenido de cada individuo, se dividió en dos (representando el 50% de la biomasa) para así obtener el C almacenado en la biomasa.

Una vez obtenidas y secadas las muestras de viruta de las especies dominantes, para obtener el C calculado (C_{cal}) se seleccionaron dos muestras por especie, se molieron finamente con un Dremell (200 Series) y se colaron por un tamiz. Posteriormente fueron enviadas al laboratorio del INECOL para determinar el contenido de C mediante el equipo PerkinElmer Series II CHNS/O Analyser 2400.

Los datos de contenido de C para las especies que representaron el 80% de la dominancia relativa, se promediaron para asignar un valor a cada especie analizada. Para las especies que no se les determinó el contenido de C en el laboratorio, se obtuvo un promedio de todas las especies dominantes y ese valor se asignó en la fórmula para ser multiplicado por la biomasa y obtener el porcentaje de C almacenado por individuo (Chave *et al.*, 2005).

5.3 Análisis estadístico

Se compararon los valores de las variables estructurales, la diversidad de Shannon, la biomasa y el contenido de C almacenado en la biomasa aérea entre los cuatro usos del suelo para determinar si existen diferencias estadísticas entre estos. Antes del análisis se realizó una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk. Cuando los datos (altura, densidad, AB, biomasa, C) presentaron una distribución normal, los usos del suelo se compararon mediante un análisis de varianza (ANOVA por sus siglas en inglés) de una vía. Cuando no se encontró una distribución normal se procedió hacer una prueba estadística no paramétrica de suma de rangos de Wilcoxon. Para comparar el índice de diversidad de Shannon se utilizó la prueba de aleatorización propuesta por Solow (1993). Todos los análisis se efectuaron utilizando el programa R versión 3.3.

6. RESULTADOS

6.1 Muestreo de la vegetación

Dentro de los ocho sitios de estudio se muestrearon un total de 716 individuos pertenecientes a 39 familias, 58 géneros y 88 especies, incluyendo 1 morfoespecie (Anexo 2).

6.1.1 Estructura de la vegetación

La densidad de árboles fue estadísticamente mayor dentro de los bosques (maduro y secundario) que en los cafetales (rústico y tecnificado; $F_{3,28} = 28.03$, $p < 0.0001$). La variación de la densidad encontrada para todos los sitios fue de 50 a 1,450 ind/ha. La densidad fue mayor en el bosque secundario (863 ± 134 - $1,125 \pm 206$ ind/ha), seguido del bosque maduro (894 ± 99 - 956 ± 103 ind/ha), cafetal con manejo rústico (206 ± 71 - 219 ± 80) y por último cafetal con manejo tecnificado (100 ± 14 - 113 ± 54 ind/ha; Figura 3).

El área basal (AB) tiene una clara tendencia a disminuir con la intensificación de uso del suelo. El rango entre todos los sitios fue de 4.45 a 77.54 m²/ha. El bosque maduro fue el uso del suelo con mayor AB (56.18 ± 8.74 m²/ha), seguido del bosque secundario (33.01 ± 3.09 m²/ha), cafetal con manejo rústico (20.78 ± 2.93 m²/ha) y cafetal con manejo tecnificado (15.58 ± 5.66 m²/ha). El AB del bosque maduro es similar al del bosque secundario pero estadísticamente mayor que en los dos tipos de cafetal, mientras que el bosque secundario mostró un AB estadísticamente mayor que el cafetal con manejo tecnificado y similar al cafetal con manejo rústico ($F_{3,28} = 11.73$, $p < 0.0001$; Figura 3).

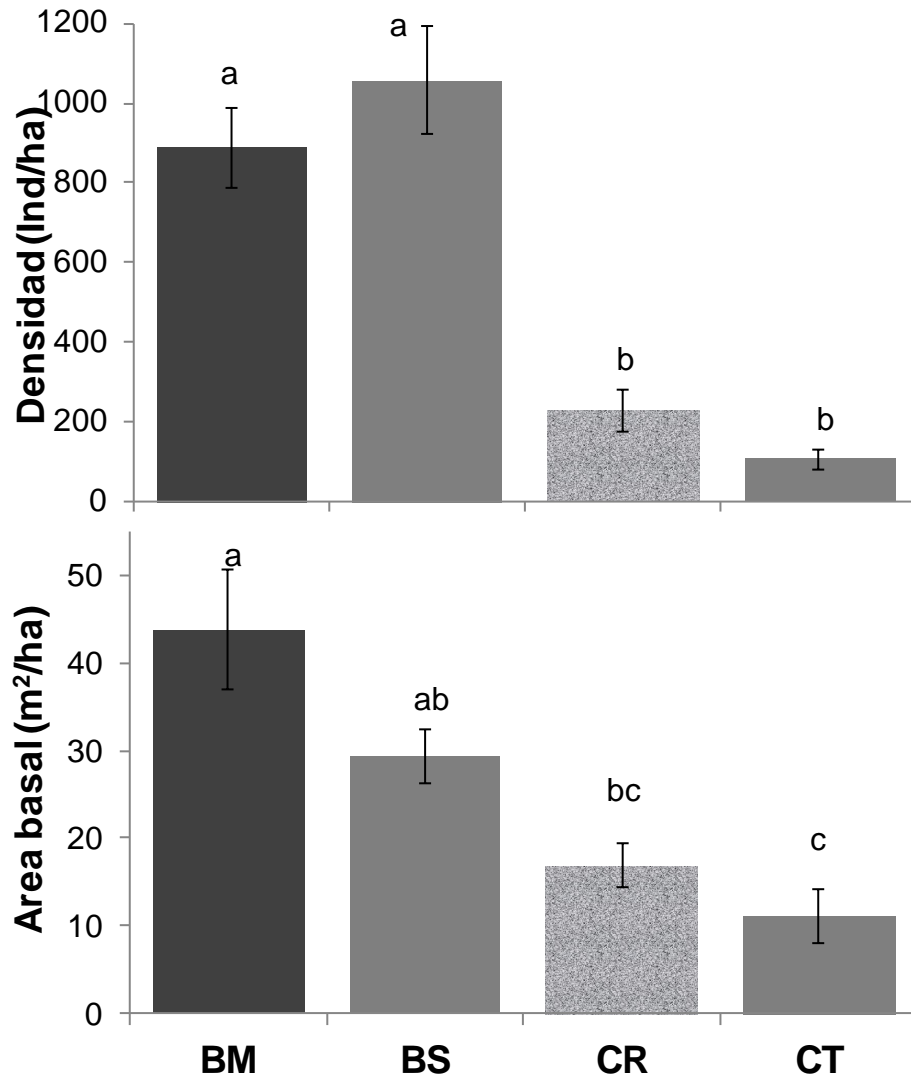


Figura 3. Densidad de individuos (superior) de los cuatro usos del suelo. Área basal (inferior) de los cuatro usos del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado. Letras iguales sobre las barras significan similitud entre los sitios.

El total de individuos dentro de todos los usos del suelo fue mayor en la categoría diamétrica del rango inferior (5-14 cm) y fue disminuyendo conforme aumentaba el DAP, encontrando muy pocos individuos en la categoría diamétrica mayor a 55 cm (Figura 4).

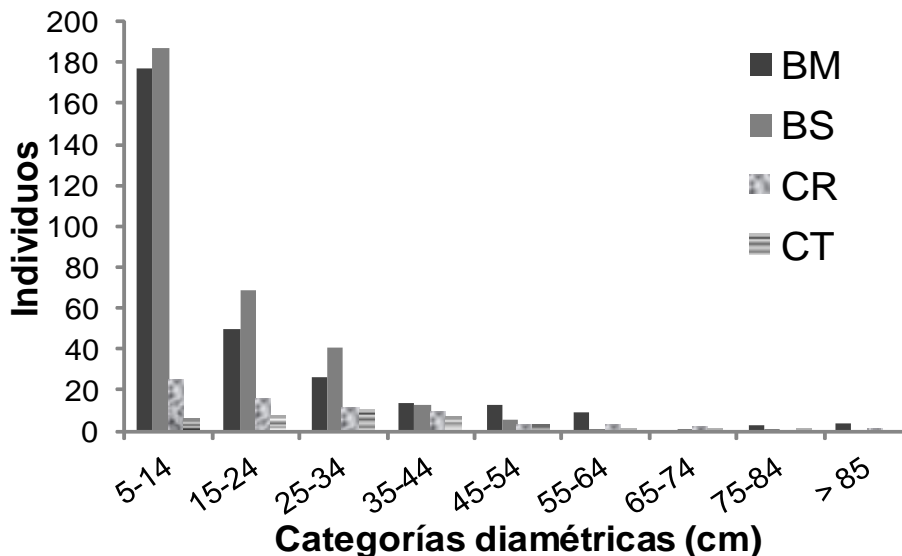


Figura 4. Número de individuos (dentro de 1,2800 m²) por rango de categorías diamétricas para cada uso del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado.

La altura promedio del total de individuos muestreados fue estadísticamente similar ($F_{3,28} = 2.02$, $p = 0.13$) para todos los usos del suelo, teniendo una variación de 12.75 a 15.96 m (Figura 5). Dentro de cada sitio, se presentó una altura promedio de 9.8 a 15.8 m en el bosque maduro, de 9.7 a 18.0 m en el bosque secundario, de 10.2 a 21.4 m en el cafetal rústico y, para el cafetal tecnificado de 7.6 a 22.6 m. Al contrario, la altura máxima promedio fue estadísticamente diferente entre los usos del suelo ($F_{3,28} = 4.59$, $p = 0.0098$) y varió de 21.11 a 31.0 m. La altura máxima promedio dentro del bosque maduro osciló entre los 29.16 y 32.85 m, para el bosque secundario varió entre 24.78 y 27.98 m, en el cafetal rústico fue de 20.48 y 22.85 m y para el cafetal tecnificado de 16.15 a 26.08 m (Figura 5).

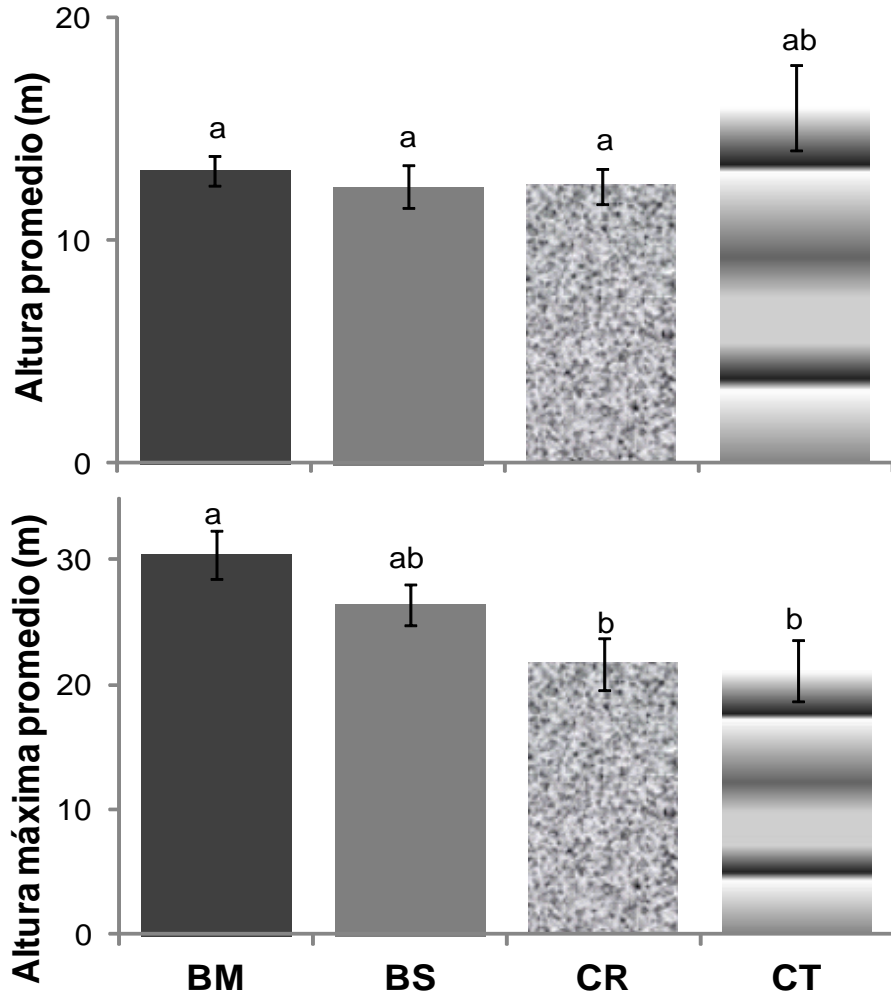


Figura 5. Altura promedio (superior) y altura máxima promedio (inferior) dentro de los cuatro usos del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado. Letras iguales sobre las barras significan similitud entre los sitios.

6.1.2 Composición de especies

Las especies con mayor número de individuos son *Liquidambar styraciflua* (98 individuos), *Oreomunnea mexicana* (97 individuos), *Clethra occidentalis* (44 individuos), *Quercus lancifolia* (37 individuos), *Styrax glabrescens* (36 individuos), *Miconia glaberrima* (31 individuos), *Alchornea latifolia* (29 individuos) y *Turpinia insignis* (28 individuos; Figura 6).

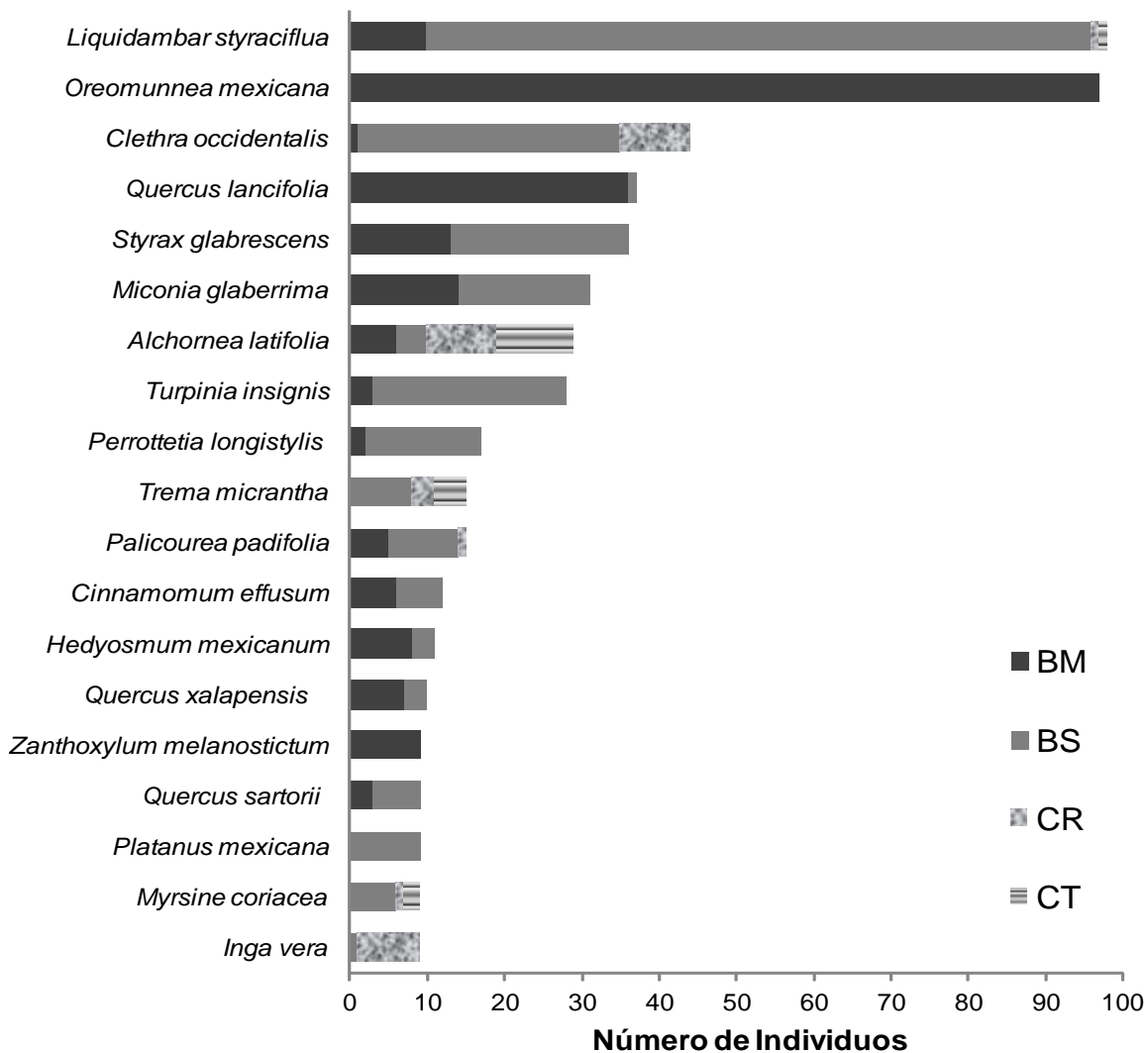


Figura 6. Número de individuos (dentro de 12,800 m²) de las especies más abundantes dentro de los cuatro usos del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado.

Las especies que sólo se encontraron dentro del bosque maduro fueron *Bernardia dodecandra*, *Citharexylum mocinnoi*, *Conostegia arborea*, *Frangula discolor*, *Magnolia schiedeana*, *Miconia mexicana*, *Oreomunnea mexicana*, *Oreopanax xalapensis*, *Ostrya virginiana*, *Prunus brachybothrya*, *Psychotria galeottiana*, *Quercus corrugata*, *Quercus cortesii*, *Quercus pinnativenulosa*, *Quercus salicifolia*, *Symplocos coccinea*, *Symplocos limoncillo*, *Zanthoxylum melanostictum* y *Zanthoxylum petenense*. Dentro del bosque secundario se encontraron las especies de *Alnus acuminata* subsp.

acuminata, *Arachnothryx capitellata*, *Ardisia compressa*, *Brunellia mexicana*, *Carpinus tropicalis*, *Cedrela odorata*, *Clethra mexicana*, *Cornutia pyramidata*, *Deppea grandiflora*, *Erythrina americana*, *Hampea integerrima*, *Heliocarpus donnellsmithii*, *Ilex discolor* var. *tolucana*, *Leucaena pulverulenta*, *Oreopanax echinops*, *Platanus mexicana*, *Saurauia leucocarpa*, *Saurauia pedunculata*, *Saurauia yasicae* y *Zanthoxylum* sp. las cuales no están presentes en los otros usos del suelo. Para el cafetal rústico se encontraron las especies de *Casearia nitida*, *Fraxinus uhdei*, *Grevillea robusta*, *Inga* aff. *laurina*, *Lippia myriocephala*, *Psidium guajava* y *Schizolobium parahyba*; mientras que en el cafetal tecnificado se encontraron las especies de *Cupressus lusitanica* y *Quercus germana*. Las especies presentes sólo en los cafetales fueron *Citrus sinensis*, *Inga inicuil* e *Inga vera* subsp. *spuria* (Anexo 2).

Las especies con mayor IVI variaron por sitio: dentro del bosque maduro fueron *Oreomunnea mexicana* en el sitio 1 (22.70) y *Quercus lancifolia* en el sitio 2 (8.50); dentro del bosque secundario fueron *Styrax glabrescens* en el sitio 3 (8.25) y *Liquidambar styraciflua* en el sitio 4 (37.28); en el cafetal bajo sombra con manejo rústico *Alchornea latifolia* en el sitio 5 (20.31) y *Lippia myriocephala* en el sitio 6 (18.04); y en el cafetal bajo sombra con manejo tecnificado *Alchornea latifolia* (54.90) e *Inga inicuil* (26.79) en los sitios 7 y 8 respectivamente. Dentro de los cuatro usos del suelo resalta la especie de *Alchornea latifolia* dentro del cafetal tecnificado (54.90), seguida de *Oreomunnea mexicana* (22.70) en el bosque maduro, *Liquidambar styraciflua* (45.23) en el bosque secundario y *Alchornea latifolia* (20.31) en el cafetal rústico (Cuadro 2).

Cuadro 2. Índice de valor de importancia de las 25 especies dominantes dentro de los cuatro usos del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado.

Especies dominantes	BM	BS	CR	CT
<i>Alchornea latifolia</i>	1.425	3.896	20.309	54.904
<i>Brunellia mexicana</i>	-	7.284	-	-
<i>Carpinus tropicalis</i>	-	2.413	-	-
<i>Cinnamomum effusum</i>	1.440	3.007	-	-
<i>Citrus sinensis</i>	-	-	5.546	12.135
<i>Clethra occidentalis</i>	0.244	21.571	12.203	-
<i>Grevillea robusta</i>	-	-	14.570	-
<i>Hedyosmum mexicanum</i>	1.898	1.722	-	-
<i>Inga inicuil</i>	-	-	22.196	26.786
<i>Inga sp.</i>	0.723	-	-	13.488
<i>Lippia myriocephala</i>	-	-	18.037	-
<i>Liquidambar styraciflua</i>	2.663	45.226	5.159	7.814
<i>Meliosma alba</i>	0.263	0.735	16.816	7.158
<i>Oreomunnea mexicana</i>	22.700	-	-	-
<i>Perrottetia longistylis</i>	0.462	10.033	-	-
<i>Platanus mexicana</i>	-	5.114	-	-
<i>Quercus germana</i>	-	-	-	5.291
<i>Quercus lancifolia</i>	8.730	0.775	-	-
<i>Quercus sartorii</i>	0.723	6.224	-	-
<i>Quercus sp.</i>	1.198	-	-	8.869
<i>Quercus xalapensis</i>	1.738	3.502	-	-
<i>Saurauia pedunculata</i>	-	1.518	-	-
<i>Styrax glabrescens</i>	2.988	8.249	-	-
<i>Trema micrantha</i>	-	11.554	17.958	32.429
<i>Turpinia insignis</i>	0.735	8.732	-	-

6.1.3 Biodiversidad arbórea

Dentro de cada uno de los sitios de estudio se presentó una riqueza de especies arbóreas ≥ 5 cm DAP que varió entre 5 y 42 especies. Dentro de los cuatro usos del suelo se presentó una riqueza de 49 especies en el bosque maduro, 46 en bosque secundario, 22 y 12 para el cafetal con manejo rústico y tecnificado, respectivamente.

El índice de diversidad de Shannon Wiener (H'), de acuerdo a la prueba de aleatorización, fue estadísticamente similar entre los cuatro usos del suelo (Figura 7). El mayor valor de diversidad se presentó en el bosque secundario ($H' = 2.902 \pm 0.0057$), seguido del bosque maduro ($H' = 2.874 \pm 0.0079$), cafetal bajo sombra con manejo rústico ($H' = 2.756 \pm 0.0111$) y cafetal bajo sombra con manejo tecnificado ($H' = 2.232 \pm 0.0207$).

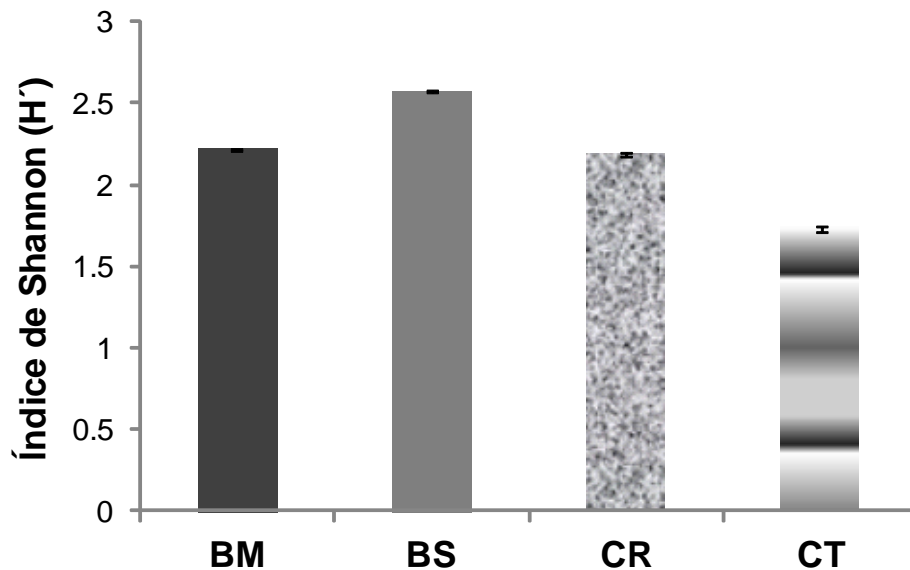


Figura 7. Índice de diversidad de Shannon Wiener (H') en los cuatro usos del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado.

6.2 Densidad de madera

Las especies que juntas representaron el 80% de la dominancia relativa dentro de todos los sitios en los cuatro usos del suelo fueron 25 (Cuadro 2). De estas sobresalen *Alchornea latifolia*, *Liquidambar styraciflua* y *Meliosma alba* ya que se encontraron en todos los usos del suelo. La especie de *Oreomunnea mexicana* únicamente se encontró en un sitio de bosque maduro como especie mono dominante.

Como resultado del análisis de las 25 especies dominantes en los cuatro usos del suelo se encontró que las 10 especies con la madera más densa fueron: *Quercus lancifolia* (0.757 g/cm^3) seguida de *Citrus sinensis* (0.738 g/cm^3), *Quercus* sp. (0.681 g/cm^3), *Quercus germana* (0.670 g/cm^3), *Quercus sartorii* (0.624 g/cm^3), *Carpinus*

tropicalis (0.599 g/cm³), *Oreomunnea mexicana* (0.591 g/cm³), *Inga* sp. (0.562 g/cm³), *Quercus xalapensis* (0.561 g/cm³) y *Liquidambar styraciflua* (0.538 g/cm³) (Cuadro3).

Cuadro 3. Especies dominantes (representan el 80% de la dominancia relativa) en los cuatro usos del suelo. Se incluyen promedios de la densidad específica de la madera (g/cm³), porcentaje de carbono (C) y nitrógeno (N) por especie y el promedio total.

Especies	Densidad específica (g/cm³)	% C	% N
<i>Quercus lancifolia</i>	0.757	47.28	0.14
<i>Citrus sinensis</i>	0.738	47.38	0.55
<i>Quercus</i> sp.	0.681	46.20	0.16
<i>Quercus germana</i>	0.670	46.97	0.20
<i>Quercus sartorii</i>	0.624	47.26	0.14
<i>Carpinus tropicalis</i>	0.599	47.27	0.61
<i>Oreomunnea mexicana</i>	0.591	47.11	0.24
<i>Inga</i> sp.	0.562	48.41	0.90
<i>Quercus xalapensis</i>	0.561	46.59	0.13
<i>Liquidambar styraciflua</i>	0.538	47.41	0.09
<i>Grevillea robusta</i>	0.527	49.04	0.22
<i>Inga inicuil</i>	0.517	48.48	0.85
<i>Turpinia insignis</i>	0.465	47.77	0.15
<i>Trema micrantha</i>	0.445	47.92	0.13
<i>Platanus mexicana</i>	0.432	47.22	0.13
<i>Styrax glabrescens</i>	0.423	47.60	0.13
<i>Alchornea latifolia</i>	0.409	47.35	0.59
<i>Lippia myriocephala</i>	0.405	47.42	0.40
<i>Clethra occidentalis</i>	0.404	48.18	0.25
<i>Meliosma alba</i>	0.390	47.65	0.23
<i>Cinnamomum effusum</i>	0.378	48.38	0.38
<i>Saurauia pedunculata</i>	0.367	47.63	0.15
<i>Perrottetia longistylis</i>	0.316	47.05	0.28
<i>Brunellia mexicana</i>	0.274	47.55	0.24
<i>Hedyosmum mexicanum</i>	0.262	47.01	0.25
Promedio	0.494	47.52	0.30

6.3 Biomasa aérea y contenido de carbono almacenado en la biomasa

La biomasa aérea fue estadísticamente diferente entre los usos del suelo ($F_{3,28} = 15.36$, $P < 0.0001$). La biomasa aérea en todos los sitios varió de 14.85 a 598.23 t/ha. En el bosque maduro (348.74 ± 25.08 t/ha) la biomasa fue mayor que en los otros usos del suelo (Figura 8). En cada uno de los usos del suelo la variación fue la siguiente: de 313.28 a 384.20 t/ha para el bosque de niebla maduro, de 144.18 a 183.42 t/ha para el bosque de niebla secundario, de 60.58 a 97.35 t/ha para el cafetal bajo sombra con manejo rústico y de 21.46 a 104.44 t/ha para el cafetal bajo sombra con manejo tecnificado (Figura 8).

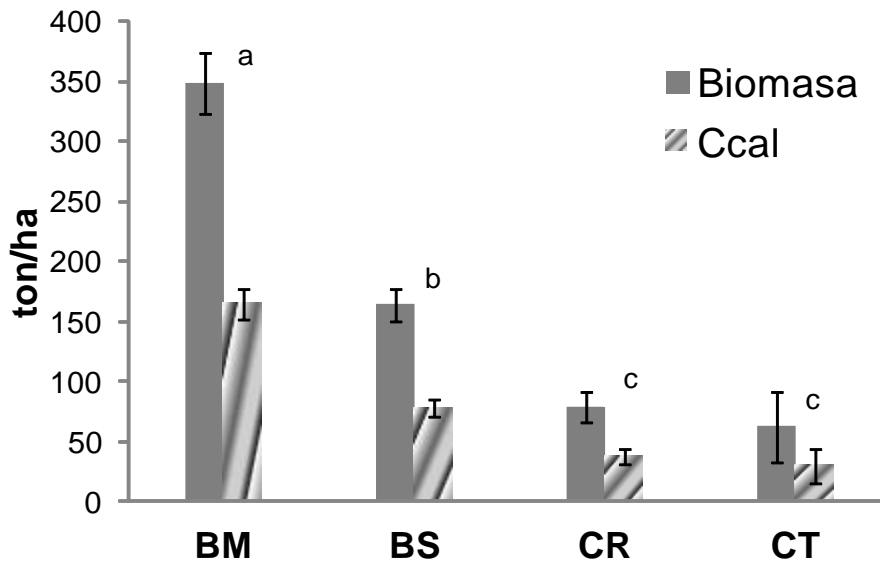


Figura 8. Biomasa aérea y carbono calculado (Ccal) almacenado (t/ha) en los cuatro usos del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado. Letras iguales sobre las barras significan similitud entre los sitios.

Al comparar la biomasa aérea versus las categorías diamétricas (Figura 9) dentro de todos los usos del suelo se observó una clara tendencia a aumentar conforme los diámetros incrementan. La relación se mantuvo al comparar la biomasa aérea con el incremento en el área basal (Figura 10).

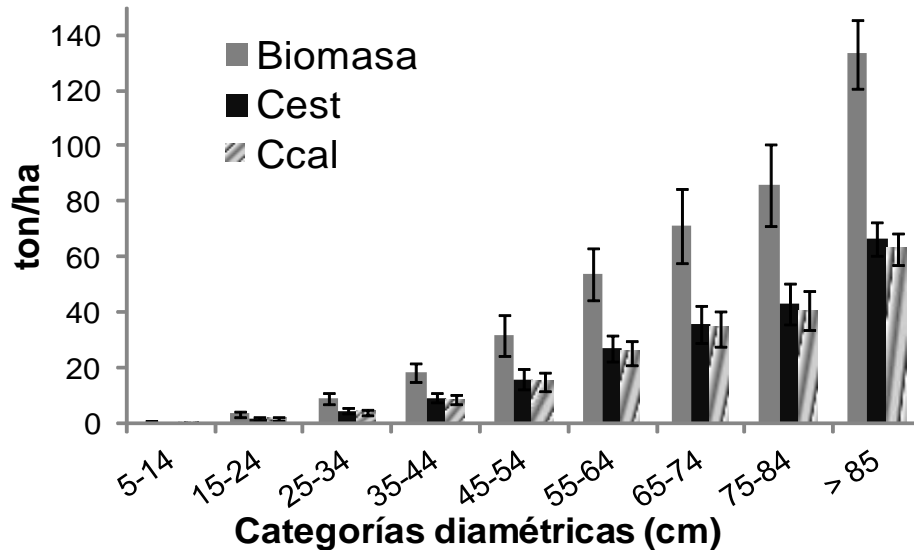


Figura 9. Contenido de biomasa aérea (biomasa), carbono almacenado estimado como el 50% de la biomasa (Cest) y carbono almacenado calculado en laboratorio (Ccal) por categorías diamétricas para todos los sitios de estudio.

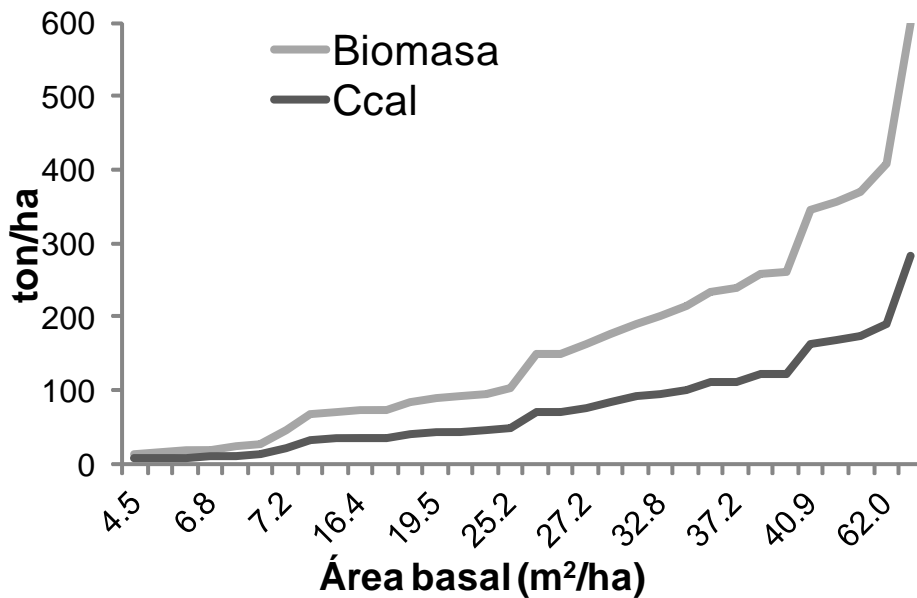


Figura 10. Relación del área basal con la biomasa aérea (biomasa) y el contenido de carbono calculado en laboratorio (Ccal) dentro de todos los sitios de estudio.

El contenido de C estimado como el 50% de la biomasa aérea (Cest) varió de 7.42 a 299.12 t/ha entre todos los sitios de estudio. El Cest fue estadísticamente diferente entre los usos del suelo ($F_{3,28} = 15.36$, $P < 0.0001$). El promedio más alto de C

se estimó en el bosque maduro (Cest: 174.37 ± 12.54 t/ha; Ccal: 164.32 ± 11.94 t/ha), seguido del bosque secundario (Cest: 81.90 ± 6.94 t/ha; Ccal: 77.78 ± 6.49 t/ha), cafetal bajo sombra con manejo rústico (Cest: 39.48 ± 6.50 ; Ccal: 37.90 ± 6.18 t/ha) y cafetal bajo sombra con manejo tecnificado (Cest: 31.48 ± 14.67 t/ha; Ccal: 30.17 ± 14.12 t/ha; Figura 11). La variación en el contenido de Ccal dentro de todos los sitios fue de 7.03 a 281.86 t/ha. Por uso del suelo fue variando de 147.44 a 181.20 t/ha dentro del bosque maduro, de 68.60 a 86.97 t/ha en el bosque secundario, mientras que en el cafetal bajo sombra con manejo rústico varió de 29.15 a 46.64 t/ha y en el cafetal con manejo tecnificado de 10.20 a 50.15 t/ha.

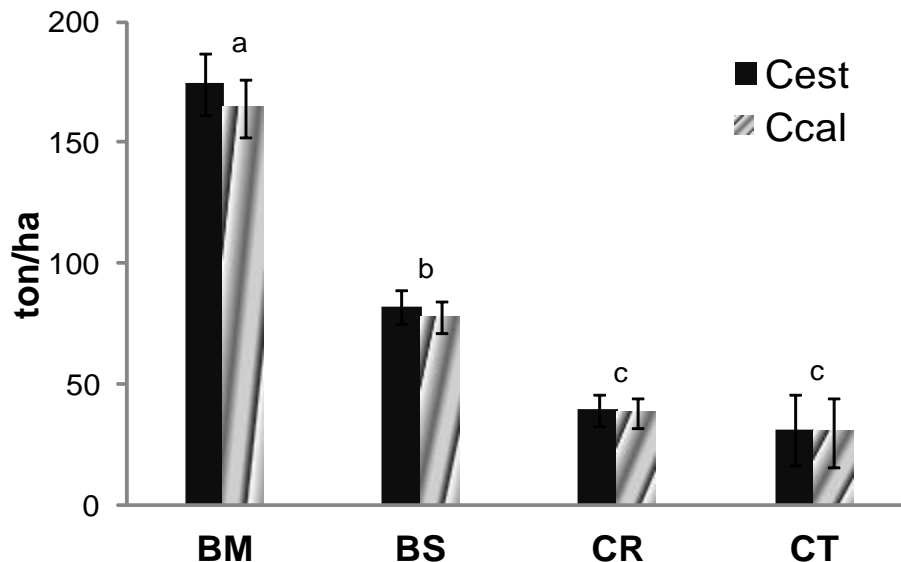


Figura 11. Contenido de carbono estimado como el 50% de la biomasa (Cest) y carbono calculado en el laboratorio (Ccal) almacenado por uso del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado. Letras iguales sobre las barras significan similitud entre los sitios.

El C calculado en laboratorio (Ccal) también fue estadísticamente diferente entre los usos del suelo (Figura 11). El contenido de Ccal almacenado en la biomasa aérea fue mayor en el bosque maduro que los otros usos del suelo (Figura 8). La misma tendencia se encontró para el bosque secundario en comparación con los cafetales. Sin embargo, entre los cafetales bajo sombra con manejo rústico y manejo tecnificado no hubo diferencias significativas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Prueba de Wilcoxon (W) para carbono calculado en los diversos usos del suelo. BM: bosque de niebla maduro, BS: bosque de niebla secundario, CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico, CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado. ns es no significativo, ** indica $P < 0.01$, *** indica $P < 0.001$, **** indica $P < 0.0001$

	BS	CR	CT
BM	60***	64****	64****
BS		58***	55**
CR			43 ns

Para verificar la exactitud de calcular el contenido de C estimado como el 50% de la biomasa (Cest), se compararon esos valores con el contenido de C calculado (Ccal) añadiendo los resultados de las mediciones directas de la densidad de la madera de 25 especies y los resultados de los análisis de contenido de C llevados a cabo en el laboratorio obtenido de las muestras de viruta. En general, se observó que el Ccal es 2.5% menor que el Cest. Sin embargo, al comprar Cest y Ccalc no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los dos métodos ($W = 328$, $p = 0.773$; Figura 11).

7. DISCUSIÓN

7.1 Usos del suelo

En un estudio sobre los diversos usos del suelo de la cuenca del Pixquiac, Veracruz, Gerez (2013) concluye que los factores que mayormente impulsaron el cambio de uso del suelo en la región son fenómenos externos a la zona. Dentro de estos fenómenos, destacan principalmente las políticas públicas, los programas gubernamentales y la dinámica poblacional; estos factores son difíciles de abordar y van más allá de los objetivos de la presente tesis. Los usos del suelo seleccionados son representativos del área de estudio ya que se encuentran asociados al manejo de los sistemas productivos de la región, la cual se ubica dentro de una zona cafetalera inmersa en la franja del bosque de niebla (Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012; Gerez, 2013; Muñiz, 2012; Pineda-López *et al.*, 2005; Williams-Linera, 2007).

En esta zona predomina un suelo andosol franco arcilloso con textura media (INEGI, 2010) lo cual, junto con otros factores ambientales (temperatura, precipitación, humedad), influye en la densidad específica de la madera por especie y en la biomasa aérea (Ordóñez *et al.*, 2015). Esto se ve reflejado en los resultados de contenido de C almacenado en la biomasa forestal y puede ocasionar cambios en los resultados de biomasa aérea y C almacenado dentro del BN, al encontrarse este tipo de vegetación en sitios con condiciones ambientales muy diversas.

Los resultados indican que a mayor intensidad de uso del suelo menor el C almacenado, lo cual es una consecuencia del contenido de biomasa. Por lo tanto, el uso del suelo es un factor que influye notablemente tanto en contenido de biomasa como en C almacenado dentro del bosque. Un buen manejo del ecosistema generará un menor impacto y, de esta manera, se pueden proteger los servicios ecosistémicos que nos proporcionan.

Sumado a lo anterior, y aunque el compartimento suelo no se incluye en la presente investigación, si consideramos el contenido de C que se encuentra almacenado en el suelo dentro del BN, las pérdidas del C también disminuyen conforme aumenta la intensificación del uso del suelo. Esta pérdida se incrementa desde un 2.5% en el cafetal bajo sombra con manejo rústico hasta 18.4% en el bosque de niebla maduro (Romero-Uribe, 2017). Estos valores son importantes a considerar para la protección de bosques y cafetales, debido a que, al realizar un cambio de uso del suelo, se pierde una gran cantidad de C almacenado en el ecosistema, no sólo por la pérdida de biomasa, sino también por la pérdida del suelo.

7.2 Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas. Estos servicios ocurren gracias a la existencia de las interacciones entre los organismos y las condiciones abióticas dentro de los ecosistemas (Caballero, 2014; Costanza *et al.*, 1997; MEA, 2005), y son proporcionados principalmente por los sistemas forestales. Sin embargo, otros usos del suelo contribuyen en diferentes

proporciones, como se demuestra en la presente investigación, particularmente en relación a biodiversidad y almacén de C.

Dentro del país, la cuenca alta del río La Antigua ocupa la ladera oriental expuesta al Golfo de México, esta zona corresponde a una Región Terrestre Prioritaria para zonas de alto valor ecosistémico (CONABIO, 2010). Los diversos usos del suelo que se encuentran dentro de la cuenca, como los cafetales bajo sombra del BN, proporcionan servicios ecosistémicos tangibles, como la alimentación e intangibles, como la biodiversidad y el almacén de C (García-De la Cruz *et al.* 2013; Hall *et al.*, 2015; Keesing *et al.*, 2015; Pineda-López *et al.*, 2005). Dado estos servicios que proporcionan es importante considerarlos dentro del paisaje del BN para su protección.

Biodiversidad y C son servicios de gran importancia para la vida (Isbell *et al.* 2015) debido al papel que juegan en el equilibrio de las interacciones que ocurren en el planeta. La biodiversidad se encuentra más documentada en el centro de Veracruz, sin embargo hay pocos estudios relacionados con el C almacenado en la biomasa, ya que el servicio ecosistémico más abordado es el suministro de agua. Por tal motivo se deben realizar trabajos más completos dentro del BN para, de esta forma, poder valorar correctamente este servicio ecosistémico.

7.3 Estructura de la vegetación

Los diferentes usos del suelo estudiados en la cuenca alta de La Antigua tienen diferente complejidad estructural en el estrato arbóreo. Esta estructura de la vegetación se ha reportado en términos de área basal, riqueza, densidad de árboles y altura del dosel para bosques de niebla (Corral *et al.*, 2005; Dávila *et al.*, 2008; Mejía-Domínguez *et al.*, 2004; Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2003; Williams-Linera, 1991; Williams-Linera *et al.*, 1996, 2013; Williams-Linera y López-Gómez, 2008), para bosques secundarios (Roncal-García *et al.*, 2008; Williams-Linera *et al.*, 2005) y cafetales bajo sombra (Dávila *et al.*, 2008; López, 2004; Williams-Linera y López-Gómez, 2008), encontrando una gran heterogeneidad en la zona.

En el presente estudio, se encontró que la estructura de la vegetación fue variable. Esto implicó que fuera similar a otros BN con respecto a su densidad de

individuos y AB (Mejía-Domínguez *et al.*, 2004; Williams-Linera, 1991; Williams-Linera *et al.* 1996, 2013). Pero también diferente a otros en lo que corresponde a la densidad de individuos, AB, riqueza y altura (Corral *et al.*, 2005; Dávila *et al.*, 2008; Sánchez-Rodríguez *et al.*, 2003; Williams-Linera y López-Gómez, 2008). Esto sigue mostrando la gran diversidad que se encuentra dentro del BN al presentar mayor o menor densidad, área basal y altura que lo reportado por otros autores para el mismo tipo de vegetación en el país. Esta variabilidad es natural en la estructura del BN y se debe a la gran heterogeneidad de estos bosques relacionada con la altitud, topografía, exposición y latitud (Williams-Linera 2002; Williams-Linera *et al.* 2013).

Con respecto al bosque secundario, encontramos diferencias en la densidad y el AB con lo reportado por Roncal-García *et al.* (2008) y Williams-Linera *et al.* (2005), lo que probablemente se deba a las diferentes edades de abandono de los sitios reportados con respecto a nuestros sitios de estudio. Dentro de los cafetales bajo sombra tuvimos similitud en la estructura de la vegetación (densidad y AB) con lo reportado por Williams-Linera y López-Gómez (2008) sin embargo, encontramos otro trabajo que reporta una estructura diferente (Dávila *et al.*, 2008), incluso en zonas cercanas a los sitios de estudio (López-Gómez, 2004), lo que probablemente se debe al manejo dentro del cafetal.

7.4 Composición florística

La composición florística arbórea para todos los sitios dentro de los usos del suelo estudiados, coincide con las especies que se encuentran en la vegetación del bosque de niebla en la misma zona (Catalán *et al.*, 2003; García-Franco, 2008; Williams-Linera *et al.*, 1996, 2013) y en otros bosques de niebla de México (Alcántara y Luna, 1997). La composición de especies arbóreas se presentó desde especies mono dominantes de bosque como *Oreomunnea mexicana*, a especies de bosque y de cafetales (*Annona cherimola*, *Clethra occidentalis*, *Myrsibe coriácea*, *Palicourea padifolia*, *Trema micrantha*). También hubo especies presentes en todos los usos del suelo (*Alchornea latifolia*, *Liquidambar styraciflua* y *Meliosma alba*) y especies sólo presentes en

cafetales (*Citrus sinensis*, *Inga inicuil* e *Inga vera* subsp. *spuria*), aunque de estas últimas, se puede atribuir a la introducción de la especie (*Citrus sinensis*).

En el bosque secundario encontramos similitud en la composición florística arbórea con lo reportado por Roncal-García *et al.* (2008) y también encontramos, en el trabajo de Williams-Linera *et al.* (2005) que reportan una composición diferente. Lo que corresponde al cafetal bajo sombra encontramos diferencias con lo reportado por Williams-Linera y López-Gómez (2008) en zonas cercanas. Estas similitudes y diferencias, como ya se mencionó, corresponden a la heterogeneidad que caracteriza a este tipo de vegetación y a las diferencias geográficas entre los sitios.

La biodiversidad arbórea es diferente en los usos de suelo. Aparentemente, la diversidad disminuye conforme aumenta la intensificación del uso del suelo (Gerez, 2013; Williams-Linera *et al.*, 2002). Sin embargo, la biodiversidad arbórea varía dentro de distintos usos del suelo en una región, y esto favorece la permanencia de especies locales si se consideran muchos sitios dentro de una región. Por lo tanto, un factor importante a considerar para la permanencia de las especies arbóreas nativas de la región, es considerar todos los usos del suelo y la protección de muchos sitios. Por ejemplo, en el presente trabajo podemos decir que, dentro de los cafetales bajo sombra estudiados (rústico y tecnificado) encontramos una alta presencia de especies arbóreas del bosque de niebla de la región (*Alchornea latifolia*, *Clethra occidentalis*, *Liquidambar styraciflua*, *Meliosma alba*, *Quercus* sp., *Trema micrantha*), por lo que es importante conservar estas prácticas agroforestales de la zona, ya que aportan en mantener la biodiversidad regional.

7.5 Biomasa aérea

La biomasa aérea y el contenido de C almacenado en especies arbóreas del bosque de niebla maduro, bosque de niebla secundario y cafetales bajo sombra se determinaron con un método estándar, y fue seleccionado ya que se considera el más certero (Chave *et al.*, 2005, Ensslin *et al.*, 2015). La compleja heterogeneidad de estos bosques y la diversidad de manejo, también ocasionan variedad en los valores reportados de la biomasa aérea y el C almacenado.

La variación de biomasa que reportamos (62.95 a 348.74 t/ha) coincide con lo reportado en otros trabajos realizados en bosques húmedos de montaña y agroecosistemas cafetaleros. Por ejemplo, Peeters *et al.* (2003) reportan que para cafetales tradicionales en Chiapas, México, la biomasa es similar a la reportada en este estudio (64.1 t/ha), pero para cafetales bajo sombra de *Inga* sp. es menor (38.6 t/ha) a lo que encontramos en cafetales bajo sombra con manejo tecnificado. Polzot (2004) menciona que en bosques y plantaciones de café con diferentes sombras en Costa Rica, la biomasa varía de 22.0 a 394.2 t/ha. Ensslin *et al.* (2015) reportan para el Monte Kilimanjaro en Tanzania, que la biomasa varía entre cafetales y bosque de montaña de 46.9 a 355.4 t/ha. Álvarez-Arteaga *et al.* (2013) reportan una variación en la biomasa para bosques montanos de niebla dentro de la Sierra Norte de Oaxaca que va de 220.90 a 301.66 t/ha. Sin embargo, en bosques más norteños, como El Cielo, Tamaulipas, se han reportado valores más bajos de biomasa aérea (107.1 t/ha) (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2006). Mientras que en un gradiente climático en el norte de Sudamérica, Álvarez-Dávila *et al.* (2017) reportan una gran variación en la biomasa forestal (7.7 - 386.9 t/ha), la cual está relacionada con la disponibilidad de agua. Esta gran variabilidad, está fuertemente asociada al tipo de uso del suelo y la intensidad del manejo de este, y probablemente está influenciada por las condiciones microclimáticas de cada lugar. Sumado a esto, debemos considerar las condiciones del BN, las cuales presentan grandes diferencias, incluso en lugares cercanos uno del otro.

7.6 Densidad de la madera

La densidad de la madera puede variar entre usos del suelo dentro de una región (Zanne *et al.*, 2009). Los valores promedio de densidad de madera también varían entre tipos de vegetación (Ordóñez *et al.*, 2015). Por ejemplo, en un bosque húmedo montano del Amazonas, la densidad promedio de la madera fue de 0.63 g/cm³ (Álvarez-Dávila *et al.*, 2017); para todo el BN en México el valor promedio reportado es 0.60 g/cm³ (Ordóñez *et al.*, 2015) y para otro BN en Tamaulipas se reporta un valor de 0.46 g/cm³ (Rodríguez-Laguna *et al.*, 2006); mientras que nuestro valor promedio obtenido para las 25 especies dominantes fue de 0.49 g/cm³. Este valor es menor que el

reportado en el metaanálisis para BMM de México pero es similar al reportado para El Cielo, Tamaulipas; lo que sigue mostrando la gran variabilidad de este tipo de vegetación, incluso dentro de una misma especie.

En el presente estudio, sobresale el género *Quercus* ya que las especies de este género presentan la madera con los valores más altos de densidad: *Quercus lancifolia* (0.757 g/cm³), *Quercus* sp. (0.681 g/cm³), *Quercus germana* (0.670 g/cm³) y *Quercus sartorii* (0.624 g/cm³). El género *Quercus* está representado por varias especies y alcanza tallas muy grandes dentro del BN (Williams-Linera et al. 2013). Los valores de densidad de madera junto con el C que almacenan en la biomasa, se deben considerar para la protección de este género, ya que en la zona aún se utiliza para la producción de carbono.

7.7 Contenido de carbono

El contenido de C almacenado en la biomasa aérea forestal es importante porque es un servicio ecosistémico. Generalmente, el contenido de C almacenado en ecosistemas forestales se reporta como el 50% de la biomasa aérea (Campo *et al.*, 2016; Chave *et al.*, 2005, Magaña *et al.*, 2004). En el presente estudio comparamos los dos acercamientos: 1) usar un porcentaje fijo para estimar el C en biomasa (50%) y 2) calcular el porcentaje de C almacenado en la biomasa utilizando mediciones de la densidad específica de la madera por especie y por sitio de estudio, añadiendo los resultados de laboratorio del análisis de C en las muestras de viruta. Cuando usamos la aproximación de 50% para cada uso del suelo encontramos una sobreestimación del 2.5% por arriba del valor encontrado al utilizar la densidad de la madera para medir el C calculado. El acercamiento más preciso para calcular el C almacenado, aunque no es significativo, da una diferencia de varias toneladas. Al extrapolar estos valores a un nivel global, aun la diferencia de pocas toneladas es proporcionalmente muy grande. Por ejemplo, solo para bosque, la diferencia entre C_{est} (174.37 t/ha) y C_{cal} (164.32 t/ha) fue de 10.05 t/ha. Al extrapolar para los bosques de México, la diferencia puede ser de miles de t/ha de C que se está sobreestimando como almacenadas por la masa forestal. Dado esto, en futuras investigaciones se deben considerar, no sólo el DAP y la

altura total de los individuos, sino también la densidad de madera, y si es posible, el C almacenado tomado de muestras de virutas.

El contenido de C reportado en el presente trabajo para los cuatro usos del suelo (30.17-164.32 t/ha) se encuentra dentro del rango reportado por Etchevers *et al.* (2001) para bosques y cafetal en la Sierra Norte de Oaxaca (24.67-93.15 t/ha), y por lo reportado por Campo *et al.* (2016) para bosques tropicales de México (27.5-117.0 t/ha). Dentro del bosque los valores que encontramos coinciden con lo reportado por Polzot (2004) en un bosque de Costa Rica. Otros autores han reportado valores mayores para bosques tropicales primarios (207.7 t/ha) y secundarios (127.0 t/ha) de Colombia (Gilroy *et al.*, 2014). Sin embargo, para bosques de montaña de Oaxaca (Acosta-Mireles, 2003) y para bosques y fincas del estado de Veracruz (Dávila *et al.*, 2008), los valores reportados son menores. De igual forma que el C almacenado en la biomasa de los bosques, encontramos una variabilidad de resultados muy amplia en el contenido de C almacenado en cafetales bajo sombra (Ávila *et al.*, 2001; Espinoza-Domínguez *et al.*, 2012; Magaña *et al.*, 2004; Moguel y Toledo, 1999; Ortiz-Ceballos, 2004). Estas diferencias en los resultados pueden deberse a las condiciones de cada zona de estudio o quizás, a las diferentes metodologías empleadas (destrucciona, no destructiva, con ecuaciones alométricas incluyendo o no la altura de los árboles y la densidad de la madera).

El porcentaje encontrado en el presente trabajo de almacén de C en la biomasa aérea (47.5%) coincide con lo reportado por Martin y Thomas (2011) quienes encontraron un valor de 47.3% de la biomasa para árboles tropicales en Panamá. Hay gran variabilidad en el contenido de C entre especies, incluso al estimarlo incluyendo la densidad específica de la madera en las ecuaciones alométricas. Se ha reportado (Martin y Thomas, 2011) que no existe relación entre la altura total del individuo con la densidad de la madera y el contenido de C. Sin embargo pudimos observar, al igual que lo reportado por Álvarez-Dávila *et al.* (2017), que existe una fuerte relación entre área basal y el almacén de C.

8. CONCLUSIONES

A partir de los resultados de esta investigación, se puede concluir que:

1) En la cuenca alta de La Antigua, la presencia de diferentes usos del suelo como cafetales de sombra, bosques secundarios o acahuales asociados a los fragmentos de BN contribuyen notablemente a mitigar la pérdida de la biodiversidad regional y al funcionamiento e integridad del paisaje del bosque de niebla.

2) Es importante conservar al BN por su gran biodiversidad de especies arbóreas y la cantidad de C que almacena, sin embargo, también es importante considerar a los cafetales bajo sombra, ya que juntos ayudan a mantener valiosos servicios ecosistémicos en la región.

3) Aunque se hipotetizó que al aumentar la biodiversidad arbórea también aumentaría el contenido de C, el presente estudio indicó que la biomasa está directamente relacionada con el área basal. Por lo que el mayor contenido de C registrado, no se relaciona con la biodiversidad. Los valores obtenidos proporcionan una aproximación del C almacenado en el BN y el cafetal bajo sombra de la región centro del estado de Veracruz.

4) El cálculo del almacén de C a partir de la estimación de 50%, implica sobrestimar en 2.5% el C dentro del BN. Aunque esta diferencia puede considerarse mínima, implica entre 10 y 1.3 t/ha de C de sobreestimación almacenado en la biomasa.

Se recomienda hacer estudios más completos donde se incluyan otras variables para poder determinar qué es lo que influye directamente en los contenidos de C almacenados en la biomasa aérea. Estas variables pueden ser precipitación, humedad, pendiente, exposición al sol, suelo. Además que se deben tomar en cuenta las diferencias geográficas de cada sitio y el manejo que se le da.

REFERENCIAS

- Acosta-Mireles, M., K. Quednow, J. Etchevers y C. Monreal. 2001. Método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. INIFAP Colegio de Postgraduados, México. P. 11. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile.
- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez y J.D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36:725-736.
- Acosta-Mireles, M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados.
- Acosta-Mireles, M., F. Carrillo Anzures y R.G. Gómez Villegas. 2011. Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(4): 529-543.
- Alcántara-Ayala, O. y I. Luna-Vega. 1997. Florística y análisis biogeográfico del bosque mesófilo de montaña de Tenango de Doria, Hidalgo, México. *Anales Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Botánica* 68:57-106.
- Aldrich, M., P. Bubb, S. Hostettler y H. Van de Wiel. 2000. Bosques nublados tropicales montanos. Tiempo para la acción. WWF International/IUCN The World Conservation Union. Cambridge. Inglaterra.
- Álvarez-Arteaga, G., N.E. García Calderón, P. Krasilnikov y F. García-Oliva. 2013. Almacenes de carbono en bosques montanos de niebla de la sierra norte de Oaxaca, México. *Agrociencia* 47: 171-180.
- Álvarez-Dávila, E., L. Cayuela, S. González-Caro, A.M. Aldana, P.R. Stevenson, O. Phillips, A. Cogollo, M.C. Peñuela, P. Von Hildebrand, E. Jiménez, O. Melo, A.C. Londoño-Vega, I. Mendoza, O. Velásquez, F. Fernández M. Serna, C. Vázquez-Rua, D. Benítez y J.M. Rey-Benayas. 2017. Forest biomass density across large climate gradients in northern South America is related to water

availability but not with temperature. *Plos One* 12(3): e0171072.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171072>

- Asbjornsen, H. y R. Manson. 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*. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. Panamá. 128-141.
- Ávila, G., F. Jiménez, J. Beer, M. Gómez, M. Ibrahim. 2001. Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 8(30): 32-35
- Balvanera, P., J.S. Hall, C. Raudsepp-Hearne, S. Van Bael, E. Murgueitio y Z. Calle. 2015. *La gestión de cuencas hidrográficas para asegurar los servicios ecosistémicos en las laderas del neotrópico. Capítulo 3: La importancia de los servicios ecosistémicos para la sociedad*. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. Panamá, 52-62.
- Caballero, N. 2014. Revisión del marco conceptual sobre Servicios Ecosistémicos. Sección 1. Foro sobre Servicios Ecosistémicos. Memoria de los Foros Técnicos sobre Servicios Ecosistémicos en Uruguay. Instituto Interamericano de Cooperativa para la Agricultura (IICA). Imprenta Boscana SR. Montevideo, Uruguay. 8-15.
- Campo, J., F. García, A. Navarrete y C. Siebe. 2016. Almacenes y dinámica del carbono orgánico en ecosistemas forestales tropicales de México. *Tierra Latinoamericana*. 34(1): 31-38.
- Catalán, C., L. López-Mata y T. Terrazas. 2003. Estructura, composición y diversidad de especies leñosas de un bosque mesófilo de montaña de Guerrero. México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Serie Botánica* 74(2): 209-230.
- Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M.A. Cairns, J.Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromand, N. Higuchi, T. Kira, J.-P. Lescure, B.W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra, T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forest. *Oecologia* 145(1):87-99.

- CONABIO. 2010. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. <http://conabio.gob.mx>
- CONAFOR. 2009. Comisión Nacional Forestal. *Inventario Nacional Forestal y de Suelos de México 2004-2009. Una herramienta que da certeza a la planeación, evaluación y el desarrollo forestal de México*. Zapopan, Jalisco, México. 22 p.
- CONAGUA. 2013. Comisión Nacional del Agua (México). <https://www.gob.mx/conagua>
- Costanza, R., R. d'Arge, R. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naemm, R.V. O'Neill, J. Paruelo, P. Sutton, M. Van y R.G. Raskin. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387(6630): 253- 260.
- Corral, J.J., O.A. Aguirre, J. Jiménez y S. Corral. 2005. Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el bosque mesófilo de montaña "El Cielo", Tamaulipas, México. *Investigaciones Agrarias: Sistema de Recursos Forestales* 14(2): 217-228.
- Cuevas-Reyes, P. 2010. Importancia de la resiliencia biológica como posible indicador del estado de conservación de los ecosistemas: implicaciones en los planes de manejo y conservación de la biodiversidad. *Biológicas* 12(1): 1-7.
- Dávila, R., M.I. Rodríguez y E.M. Pinillos-Cueto. 2008. *Almacenamiento de carbono. Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz. Sección III. Servicios Ambientales. Capítulo 16*. 223-233.
- Ensslin, A., G. Rutten, U. Pommer, R. Zimmermann, A. Hemp y M. Fischer. 2015. Effects of elevation and land use on the biomass of trees, shrubs and herbs at Mount Kilimanjaro. *Ecosphere* 6(3): 45. <http://dx.doi.org/10.1890/ES14-00492.1>
- Espinoza-Domínguez, W., L. Krishnamurthy, A. Vázquez-Alarcón y A. Rivera. 2012. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(1): 57-70.
- Etchevers, J., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los stocks de carbono en diferentes compartimentos de la parte aérea y subterránea en sistemas agrícolas de ladera en México. Colegio de Postgraduados. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 1-19.

- FAO. 2000. Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) <http://www.fao.org>
- García-De la Cruz, Y., L.A. Olivares-López y J.M. Ramos-Prado. 2013. Estructura y composición arbórea de un fragmento de bosque mesófilo de montaña en el estado de Veracruz. *Revista Chapingo, serie Ciencias Forestales y del Ambiente* (RCHSCFA). 91-101.
- García-Franco, J.G., G. Castillo-Campos, K. Mehlreter, M.L. Martínez y G. Vázquez. 2008. Composición florística de un bosque mesófilo del centro de Veracruz, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México. Taxonomía y Florística*. 83: 37-52.
- Garduño, R. 2004. *Cambio climático: una visión desde México. Sección I: las bases científicas. ¿Qué es el efecto invernadero?* Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 29-39.
- Gayoso, J. y J. Guerra. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. Instituto de Manejo Forestal. Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile. *BOSQUE*, 26(2): 33-38.
- Gerez, P. 2013. Procesos locales de deforestación y recuperación de bosques: retos para la conservación en el centro de Veracruz. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Facultad de Ciencias. Tesis. México, 166.
- Gibbon, A., M.R. Silman, Y. Malhi, J.B. Fisher, P. Meir, M. Zimmermann, G.C. Dargie, W.R. Farfan y K.C. Garcia. 2010. Ecosystem carbon storage across the grassland-forest transition in the high Andes of Manu National Park, Peru. *Ecosystems*, (13): 1097-1111.
- Gibbs, H.K., S. Brown, J.O. Niles y J.A. Foley. 2007. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters* 2, 13.
- Gilroy, J.J., P. Woodcock, F.A. Edwards, C. Wheeler, C.A. Medina, T. Haugaasen y D.P. Edwards. 2014. Optimizing carbon storage and biodiversity protection in tropical agricultural landscapes. *Global Change Biology*, (20): 2162-2172.
- González-Espinosa, M., J.A. Meave, N. Ramírez-Marcial, T. Toledo-Aceves, F.G. Lorea-Hernández y G. Ibarra-Manríquez. 2012. Los bosques de niebla de México:

conservación y restauración de su componente arbóreo. *Ecosistemas*, (21): 36-54.

Guariguata, M.R. y R. Ostertag. 2002. Sucesión secundaria. *Ecología de bosques neotropicales*. Editorial Tecnológica, Cartago, Costa Rica, 591-623

Gutiérrez, G. y M. Ricker. 2014. Manual para tomar virutas de madera con el barrenador de Pressler en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.

Hall, F.S., E. Lebrija-Trejos, H. Asbjornsen y N. Aguirre. 2015. *La gestión de cuencas hidrográficas para asegurar los servicios ecosistémicos en las laderas del neotrópico. Capítulo 2: Comprender el capital natural. Parte B: patrones y procesos de los ecosistemas*. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. Panamá. 36-50.

Hall, J.S., E. Murgueitio, Z. Calle, C. Raudsepp-Hearne, R.F. Stallard y P. Balvanera. 2015. *La gestión de cuencas hidrográficas para asegurar los servicios ecosistémicos en las laderas del neotrópico. Capítulo 4: Implicaciones del cambio climático y del uso del suelo*. Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales. Panamá, 63-72.

INEGI. 2008. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.inegi.org.mx>

INEGI. 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Servicio Geológico Mexicano. Serie II. 1:250,000

IPCC. 2001. Panel Intergubernamental de Cambio Climático. <http://ipcc.ch>

Isbell, F., D. Tilman, S. Polasky y M. Loreau. 2015. The biodiversity-dependent ecosystem services debt. *Ecology Letters*, (18): 119-134.

Jaramillo, V.J. 2004. *Cambio climático: una visión desde México. Sección I: las bases científicas. El ciclo global del carbono*. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 77-85.

Keesing, F. y R.S. Ostfeld. 2015. Is biodiversity good for your health? *Science*, 349 (6245): 235-236. <http://science.sciencemag.org/>

López-Gómez, A.M. 2004. Los cafetales de sombra como reservorio de la biodiversidad de plantas leñosas del bosque mesófilo de montaña del centro de Veracruz. Tesis de maestría. Instituto de Ecología, A.C. (INECOL) 80.

- Magaña, S.M., J.M. Harmand y K. Hergoualc'h. 2004. Cuantificación del carbono almacenado en la biomasa aérea y el mantillo en sistemas agroforestales de café en el suroeste de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*. (41-42): 98-104.
- Martin, A.R. y S.C. Thomas. 2011. A reassessment of carbon content in tropical trees. *Plos One*. 6(8): 9.
- MEA. Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: synthesis*. World Resources Institute, Washington D.C.
- Mejía-Domínguez, N. R., J. A. Meave y C. A. Ruiz-Jiménez. 2004. Análisis estructural de un bosque mesófilo de montaña en el extremo oriental de la Sierra Madre del Sur (Oaxaca), México. Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal. Universidad Autónoma del Estado de México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (74): 13-29.
- Moguel, P., y V.M Toledo, 1999. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. *Conservation biology*, 13(1): 11-21.
- Muller-Dombois, D. y H. Ellenberg. 1974. Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley & Sons. United States of America, 44-66
- Muñiz, M.A. 2012. *Al filo del agua: cogestión de la subcuenca del río Pixquiac, Veracruz. Anexo 3. Descripción de la vegetación y usos de suelo, por pisos altitudinales en la cuenca del río Pixquiac*. Instituto Nacional de Ecología, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE-SEMARNAT). México, D.F., 305-318.
- Ordóñez, J.A.B., A. Galicia, N.J. Venegas, T. Hernández, M.J. Ordóñez y R. Dávalos-Sotelo. 2015. Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera y Bosques*, 21(E): 77-126.
- Ortiz-Ceballos, G., V. Mendoza, M. de la Cruz, M. Briseño, M. Alfonso, L. Trujillo Ortega y M. Ojeda Ramírez. 2004. *El agroecosistema café: crisis de mercado y sustentabilidad*. (Tesis). Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Instituto de Recursos Naturales, programa de Agroecosistemas tropicales.

- Peeters, L.Y., L. Soto-Pinto, H. Perales, G. Montoya y M. Ishiki. 2003. Coffee production, timber and firewood in traditional and Inga-shaded plantations in southern Mexico. *Agriculture, ecosystems and environment*, 95(2): 481-493.
- Pineda-López, M., G. Ortiz-Ceballos y L. Sánchez-Velásquez. 2005. Los cafetales y su papel en la captura de carbono: un servicio ambiental aún no valorado en Veracruz. *Madera y Bosques*, 11(2): 3-14.
- Polzot, C.L. 2004. *Carbon storage in coffee agroecosystems of southern Costa Rica: potential applications for the Clean Development Mechanism*. Faculty of Environmental Studies in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Environmental Studies, York University, Toronto, Ontario, Canada.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O. Aguirre-Calderón y E.J. Treviño. 2006. Estimación de carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL*, IX(2): 179-187.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, J. Meza-Rangel, O. Aguirre-Calderón y R. Razo-Zarate. 2008. Carbono contenido en un bosque tropical subcaducifolio en la reserva de la biósfera el Cielo, Tamaulipas, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2): 215-222.
- Rodríguez-Laguna, R., J. Jiménez-Pérez, O. Aguirre-Calderón, E.J. Treviño y R. Razo-Zarate. 2009. Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biósfera el Cielo, Tamaulipas, México. Universidad Autónoma Indígena de México. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable* (Ra Ximhai), 5(3): 317-327.
- Romero-Uribe, Humberto. (2017). Cambios en el almacén de carbono y nitrógeno edáficos en diferentes tipos de uso de suelo y a diferentes profundidades, en el centro de Veracruz, México. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, Veracruz, México.
- Roncal-García, S.M., L. Soto-Pinto, J. Castellanos-Albores, N. Ramírez-Marcial y B.H.J. de Jong. 2008. Sistemas agroforestales y almacenamiento de carbono en comunidades indígenas de Chiapas, México. *Interciencia*, 33(3): 200-206.
- Rzedowski, J. 1996. Análisis preliminar de la flora vascular de los bosques mesófilos de montaña de México. *Acta Botánica*, (35): 25-44.

- Sánchez-Rodríguez, E.V., L. López-Mata, E. García-Moya y R. Cuevas-Guzmán. 2003. Estructura, composición florística y diversidad de especies leñosas de un bosque mesófilo de montaña en la Sierra de Manantlán, Jalisco. Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, (73): 17-34.
- Schlegel, B., J. Gayoso y J. Guerra. 2001. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Universidad Austral de Chile. Proyecto FONDEF, 15.
- Solow, A. 1993. A simple test for change in community structure. *Journal of Animal Ecology*, 62(1): 191-193.
- Soriano-Luna, M.A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F.O. Plascencia-Escalante y R. Razo-Zárata. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4): 423-438.
- Vidriales, G., I. García, A. Martínez, P. Gerez y M.A. Muñiz. 2012. *Al filo del agua: cogestión de la subcuenca del río Pixquiac, Veracruz. Capítulo 3: Características del medio natural*, 75-134.
- Williams-Linera, G. 1991. Notas sobre la estructura del estrato arbóreo del bosque mesófilo de montaña en los alrededores del campamento "el Triunfo", Chiapas. *Acta Botánica Mexicana*, (13): 1-7.
- Williams-Linera, G., I. Pérez-García y J. Tolome. 1996. El bosque mesófilo de montaña y un gradiente altitudinal en el centro de Veracruz, México.
- Williams-Linera, G. 2002. Tree species richness complementarity, disturbance and fragmentation in a Mexican tropical montane cloud forest. *Biodiversity and Conservation* (11): 1825-1843.
- Williams-Linera, G., R.H. Manson y E. Isunza Vera. 2002. La fragmentación del bosque mesófilo de montaña y patrones de uso del suelo en la región oeste de Xalapa, Veracruz, México. *Madera y Bosques* (8): 69-85.
- Williams-Linera, G., A.M. López-Gómez y M.A. Muñiz-Castro. 2005. Complementariedad y patrones de anidamiento de especies de árboles en el paisaje de bosque de niebla del centro de Veracruz (México). Sobre Diversidad Biológica: el significado de las diversidades alfa, beta y gamma. Capítulo 12, 11.

- Williams-Linera, G. 2007. *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., Xalapa, Veracruz, México. 208.
- Williams-Linera, G. y A. López-Gómez. 2008. *Agroecosistemas Cafetaleros de Veracruz: Biodiversidad, Manejo y Conservación. Capítulo 4: Estructura y diversidad de la vegetación leñosa*. Instituto de Ecología A.C. (INECOL), Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT). México, 55-62.
- Williams-Linera, G., M. Toledo-Garibaldi y C. Gallardo. 2013. How heterogeneous are the cloud forest communities in the mountains of central Veracruz, Mexico? *Plant Ecology*, 214: 685-701.
- Zanne, A.E., G. Lopez-Gonzalez, D.A. Coomes, J. Ilic, S. Jansen, S.L. Lewis, R.B. Miller, N.G. Swenson, M.C Wiemann, and J. Chave. 2009. Global Wood Density Database. Dryad. Identifier: <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de corrección de distancia horizontal (Tomado de Schlegel *et al.*, 2001).

Pendiente		Distancia en terreno (m)						
°	%	5	10	15	20	25	30	35
5	9	5.02	10.04	15.06	20.08	25.10	30.11	35.13
6	11	5.03	10.06	15.08	20.11	25.14	30.17	35.19
7	12	5.04	10.08	15.11	20.15	25.19	30.23	35.26
8	14	5.05	10.10	15.15	20.20	25.25	30.29	35.34
9	16	5.06	10.12	15.19	20.25	25.31	30.37	35.44
10	18	5.08	10.15	15.23	20.31	25.39	30.46	35.54
11	19	5.09	10.19	15.28	20.37	25.47	30.56	35.66
12	21	5.11	10.22	15.34	20.45	25.56	30.67	35.78
13	23	5.13	10.26	15.39	20.53	25.66	30.79	35.92
14	25	5.15	10.31	15.46	20.61	25.77	30.92	36.07
15	27	5.18	10.35	15.53	20.71	25.88	31.06	36.23
16	29	5.20	10.40	15.60	20.81	26.01	31.21	36.41
17	31	5.23	10.46	15.69	20.91	26.14	31.37	36.60
18	32	5.26	10.51	15.77	21.03	26.29	31.54	36.80
19	34	5.29	10.58	15.86	21.15	26.44	31.73	37.02
20	36	5.32	10.64	15.96	21.28	26.60	31.93	37.25
21	38	5.36	10.71	16.07	21.42	26.78	32.13	37.49
22	40	5.39	10.79	16.18	21.57	26.96	32.36	37.75
23	42	5.43	10.86	16.30	21.73	27.16	32.59	38.02
24	45	5.47	10.95	16.42	21.89	27.37	32.84	38.31
25	47	5.52	11.03	16.55	22.07	27.58	33.10	38.62
26	49	5.56	11.13	16.69	22.25	27.82	33.38	38.94
27	51	5.61	11.22	16.83	22.45	28.06	33.67	39.28
28	53	5.66	11.33	16.99	22.65	28.31	33.98	39.64
29	55	5.72	11.43	17.15	22.87	28.58	34.30	40.02
30	58	5.77	11.55	17.32	23.09	28.87	34.64	40.41

31	60	5.83	11.67	17.50	23.33	29.17	35.00	40.83
32	62	5.90	11.79	17.69	23.58	29.48	35.38	41.27
33	65	5.96	11.92	17.89	23.85	29.81	35.77	41.73
34	67	6.03	12.06	18.09	24.12	30.16	36.19	42.22
35	70	6.10	12.21	18.31	24.42	30.52	36.62	42.73
36	73	6.18	12.36	18.54	24.72	30.90	37.08	43.26
37	75	6.26	12.52	18.78	25.04	31.30	37.56	43.82
38	78	6.35	12.69	19.04	25.38	31.73	38.07	44.42
39	81	6.43	12.87	19.30	25.74	32.17	38.60	45.04
40	84	6.53	13.05	19.58	26.11	32.64	39.16	45.69
41	87	6.63	13.25	19.88	26.50	33.13	39.75	46.38
42	90	6.73	13.46	20.18	26.91	33.64	40.37	47.10
43	93	6.84	13.67	20.51	27.35	34.18	41.02	47.86
44	97	6.95	13.90	20.85	27.80	34.75	41.70	48.66
45	100	7.07	14.14	21.21	28.28	35.36	42.43	49.50

Anexo 2. Listado de familias y especies dentro de cada uso de suelo. BM: bosque de niebla maduro. BS: bosque de niebla secundario. CR: cafetal bajo sombra con manejo rústico. CT: cafetal bajo sombra con manejo tecnificado.

Familia/Especie	BM	BS	CR	CT
Actinidiaceae				
<i>Saurauia leucocarpa</i> Schltld.		X		
<i>Saurauia pedunculata</i> Hook.		X		
<i>Saurauia yasicae</i> Loes.		X		
Altingiaceae				
<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	X	X	X	X
Annonaceae				
<i>Annona cherimola</i> Mill.		X	X	
Aquifoliaceae				
<i>Ilex discolor</i> var. <i>tolucana</i> (Hemsl.) Edwin ex J. Linares		X		
Araliaceae				
<i>Oreopanax echinops</i> (Schltld. & Cham.) Decne. & Planch.		X		
<i>Oreopanax xalapensis</i> (Kunth) Decne. & Planch.	X			

Asteraceae*Koanophyllon pittieri* (Klatt) R.M. King & H. Rob. X X**Betulaceae***Alnus acuminata* subsp. *acuminata* Kunth X*Carpinus tropicalis* (Donn. Sm.) Lundell X*Ostrya virginiana* (Mill.) K. Koch X**Brunelliaceae***Brunellia mexicana* Standl. X**Cannabaceae***Trema micrantha* (L.) Blume X X X**Chloranthaceae***Hedyosmum mexicanum* C. Cordem. X X**Clethraceae***Clethra mexicana* DC. X*Clethra occidentalis* (L.) Kuntze X X X*Clethra* sp. L. X X**Cupressaceae***Cupressus lusitanica* Mill. X**Dipentodontaceae***Perrottetia longistylis* Rose X X**Euphorbiaceae***Alchornea latifolia* Sw. X X X X*Bernardia dodecandra* (Sessé ex Cav.) McVaugh X**Fabaceae***Erythrina americana* Mill. X*Inga* aff. *laurina* (Sw.) Willd. X*Inga inicuil* Schltld. & Cham. ex G. Don X X*Inga* sp. Mill. X X*Inga vera* subsp. *spuria* (Humb. & Bonpl. ex Willd.) J. León X X*Inga vera* Willd. X X*Leucaena diversifolia* (Schltld.) Benth. X X*Leucaena pulverulenta* (Schltld.) Benth. X*Lonchocarpus orizabensis* Lundell X X*Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F. Blake X**Fagaceae***Quercus* aff. *corrugata* Hook. X*Quercus* aff. *lancifolia* Schltld. & Cham. X*Quercus* aff. *pinnativenulosa* C.H. Mull. X*Quercus* aff. *sartorii* Liebm. X*Quercus* aff. *xalapensis* Bonpl. X

<i>Quercus corrugata</i> Hook.	X			
<i>Quercus cortesii</i> Liebm.	X			
<i>Quercus germana</i> Schltld. & Cham.				X
<i>Quercus lancifolia</i> Schltld. & Cham.	X	X		
<i>Quercus pinnativenulosa</i> C.H. Mull.	X			
<i>Quercus salicifolia</i> Née	X			
<i>Quercus sartorii</i> Liebm.	X	X		
<i>Quercus</i> sp. L.	X			X
<i>Quercus xalapensis</i> Bonpl.	X	X		
Juglandaceae				
<i>Oreomunnea mexicana</i> (Standl.) J.-F. Leroy	X			
Lamiaceae				
<i>Cornutia pyramidata</i> L.		X		
Lauraceae				
<i>Cinnamomum effusum</i> (Meisn.) Kosterm.	X	X		
Lauraceae Juss.		X		
<i>Ocotea disjuncta</i> Lorea-Hern.	X			
<i>Ocotea psychotrioides</i> Kunth	X			
Magnoliaceae				
<i>Magnolia schiedeana</i> Schltld.	X			
Malvaceae				
<i>Hampea integerrima</i> Schltld.		X		
<i>Heliocarpus donnellsmithii</i> Rose		X		
Melastomataceae				
<i>Conostegia arborea</i> Steud.	X			
<i>Miconia glaberrima</i> (Schltld.) Naudin	X	X		
<i>Miconia mexicana</i> (Bonpl.) Naudin	X			
<i>Miconia</i> sp. Ruiz & Pav.	X	X		
Meliaceae				
<i>Cedrela odorata</i> L.		X		
Myrtaceae				
<i>Psidium guajava</i> L.			X	
Oleaceae				
<i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) Lingelsh.			X	
Platanaceae				
<i>Platanus mexicana</i> Moric.		X		
Primulaceae				
<i>Ardisia compressa</i> Kunth		X		
<i>Myrsine coriacea</i> (Sw.) R. Br. ex Roem. & Schult.		X	X	X
<i>Parathesis melanosticta</i> (Schltld.) Hemsl.	X			
Proteaceae				

<i>Grevillea robusta</i> A. Cunn. ex. R. Br.				X
Rhamnaceae				
<i>Frangula discolor</i> (Donn. Sm.) Grubov	X			
Rosaceae				
<i>Crataegus mexicana</i> DC.	X	X		
<i>Prunus brachybotrya</i> Zucc.	X			
Rubiaceae				
<i>Arachnothryx capitellata</i> (Hemsl.) Borhidi		X		
<i>Deppea grandiflora</i> Schltld.		X		
<i>Palicourea padifolia</i> (Humb. & Bonpl. ex Schult.) C.M. Taylor & Lorence	X	X	X	
<i>Psychotria galeottiana</i> (M. Martens) C.M. Taylor & Lorence	X			
Rutaceae				
<i>Citrus sinensis</i> (L.) Osbeck			X	X
<i>Zanthoxylum melanostictum</i> Schltld. & Cham.	X			
<i>Zanthoxylum petenense</i> Lundell	X			
<i>Zanthoxylum</i> sp. L.		X		
Sabiaceae				
<i>Meliosma alba</i> (Schltld.) Walp.	X	X	X	X
Salicaceae				
<i>Casearia nitida</i> (L.) Jacq.			X	
Siparunaceae				
<i>Siparuna thecaphora</i> (Poepp. & Endl.) A. DC.	X	X		
Staphyleaceae				
<i>Turpinia insignis</i> (Kunth) Tul.	X	X		
Styracaceae				
<i>Styrax glabrescens</i> Benth.	X	X		
Symplocaceae				
<i>Symplocos coccinea</i> Bonpl.	X			
<i>Symplocos limoncillo</i> Bonpl.	X			
Verbenaceae				
<i>Citharexylum mocinnoi</i> D. Don	X			
<i>Lippia myriocephala</i> Schltld. & Cham.			X	
Verbenaceae J. St.-Hil.		X		
Morfoespecie			X	