



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES IZTACALA
LANCIS, INSTITUTO DE ECOLOGÍA

**ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN CORTEZA Y MADERA DE
SEIS ESPECIES EN UNA SELVA MEDIANA SUBPERENNIFOLIA
EN QUINTANA ROO.**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
BIÓLOGA

PRESENTA:
SANDRA PAOLA GARCÍA JÁCOME

Directora de tesis:

Dra. JULIETA ALEJANDRA ROSELL GARCÍA
CIUDAD DE UNIVERSITARIA, CDMX, MARZO 2017



**INSTITUTO
DE ECOLOGIA**
UNAM



Laboratorio
Nacional de las Ciencias
de la Sostenibilidad



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

García
Jácome
Sandra Paola
sandrag.jacome@gmail.com
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Estudios Superiores Iztacala
Biología
53 68 62 81

2. Datos del Tutor

Rosell
García
Julieta Alejandra

3. Datos del sinodal 1

Romero
Rangel
Silvia

4. Datos del sinodal 2

Aguilar
Rodríguez
Silvia

5. Datos del sinodal 3

Rojas
Zenteno
Eequiel Carlos

6. Datos sinodal 4

Rubio
Licona
Liliana Elizabeth

7. Datos del trabajo escrito

Almacenamiento de carbono en corteza y madera de seis especies de en una selva mediana subperennifolia en Quintana Roo.

90 p.
2017

DEDICATORIA

Gracias al apoyo de muchas personas que son imprescindibles en mi vida, pude alcanzar mis metas y llegar hasta este momento. A todas ellas les dedico con todo mi amor este logro.

A mis papas Ángeles y Eric por ser mi ejemplo a seguir, por ser mi inspiración, por su gran amor. Por enseñarme a valorar las cosas simples de la vida, por confiar en mi. Además de siempre alentarme a seguir mis sueños a pesar lo difícil que puede ser el camino. Los amo.

A mi hermanos Ximena y Luis por su gran ayuda, su paciencia en mis momentos de estrés, por su apoyo en todos los ámbitos, por hacerme reír, por las peleas y reconciliaciones y por siempre estar ahí.

A mi abuelita Vange por enseñarme a sonreírle a la vida y a seguir adelante, por sus buenas lecciones y por ser siempre mi Bolis.

A mis tías Mireya y Edwina por darme su apoyo incondicional, por su alegría, por consentirme, por enseñarme muchas cosas valiosas de esta vida y por estar siempre al pendiente de mí.

A mi padrino Victor por sus consejos elocuentes y por su apoyo en este camino recorrido.

A la familia Martí García por su apoyo y cariño, ya que la distancia no es un obstáculo.

A mi tío Edgar y Marlen por su ayuda y paciencia.

A Abraham, la nube que me ayuda a estar en ese cielo azul. A siempre sacarme una sonrisa a pesar de los malos momentos, por estar a mi lado y por todo su cariño.

A mi abuelito† por inculcarme el valor del estudio y a mi tío Güicho† por siempre cantarle a la vida. Por haber formado parte de mi vida y su gran amor. Nunca los olvidaré.

A toda mi gran familia.

“Constancia más trabajo es igual a tu realidad”

Eric García

AGRADECIMIENTOS

A la UNAM, a la Facultad de Estudios Superiores Iztacala y a la Facultad de Ciencias por brindarme conocimientos y experiencias invaluable, disfrutando así las mejores etapas de mi vida.

Al Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad del Instituto de Ecología, y al Instituto de Biología, UNAM, por brindarme un espacio para el desarrollo de este trabajo.

A mi directora de tesis, la Dra. Julieta A. Rosell García por su incondicional apoyo, su paciencia y su dirección. Al igual que por compartir sus conocimientos y experiencia en estudios sobre este tema y otros más. Por creer en mí, motivarme a mejorar y a dar lo mejor; también por su amistad y las risas compartidas.

A mis sinodales, que durante todo este proceso me brindaron conocimientos y tiempo para las revisiones que me ayudaron a mejorar mi escrito significativamente: Dra. Silvia Romero Rangel, Dra. Silvia Aguilar Rodríguez, M en C. Ezequiel Carlos Rojas Zenteno y a la M. en C Liliana Rubio Licona.

Al Ing. José Arreola por posibilitar este trabajo a través de su apoyo constante, tanto en campo como en el análisis de los datos, por compartir información de la selva del Ejido, por su tiempo y sus sugerencias. A U'yool'ché A.C. por el préstamo de sus instalaciones para realizar parte de este trabajo.

A la M. en C. Marcela Olgún, por posibilitar este trabajo a través de su apoyo como enlace con el ejido y con el Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono (SMIC) de la CONAFOR establecido en el Ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. Al Biol. Gonzalo Sánchez Santos y al resto del equipo del SMIC por compartir información sobre almacenamiento de carbono en este sitio.

A los ejidatarios de Felipe Carrillo Puerto, principalmente a Don Elías Be Cituk y Don Julián Koyoc Pacab autoridades del ejido, por autorizar este trabajo en su selva y por el apoyo con el trabajo de campo, al igual que a Milton Montalvo Hau por su ayuda con la colecta de las muestras, y por compartir su conocimientos del

bosque. A todos ellos agradezco los buenos momentos y su gran labor en cuidar y mantener la selva viva.

Por la asistencia en el uso del microscopio AxioZoom.V16 y en la técnica fotográfica a la Biól. Susana Guzmán Gómez. A la Biól. Karen Vázquez y al Dr. Calixto León-Gómez por la ayuda y asesoría en la preparación de las laminillas anatómicas.

Esta investigación fue realizada gracias al Programa UNAM-DGAPA-PAPIIT IA201415 "Ecología funcional de la corteza", y al proyecto CONACYT 237061 "Ecología y evolución de la corteza: un enfoque comparativo para aportar a problemáticas ambientales". Agradezco el financiamiento de esta investigación y el apoyo económico que me fue otorgado para el desarrollo de esta tesis. También agradezco al Programa Man and the Biosphere de la UNESCO que también financió parte de esta investigación a través del premio Young Scientist Award a mi asesora.

Al P. Biol. David Abraham Pérez Martínez y al M. en C. Matiss Castorena por su apoyo con la colecta de datos en el campo. A la P. Biol. Cipatli Jiménez Vera por su asesoramiento estadístico.

A toda mi hermosa y extensa familia, por su incondicional apoyo y su gran amor.

A mis amigos y compañeros de toda la vida y a los que conocí en la Facultad, que siempre me brindaron su apoyo, cariño y preciados momentos juntos.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
MARCO TEÓRICO	6
Cambio global/ cambio climático.....	6
Los bosques como sumideros de carbono.....	8
Políticas internacionales y nacionales sobre el manejo de carbono.....	10
Fotosíntesis y producción de biomasa.....	12
Madera y corteza como reservorios de carbono	13
Estimación de la biomasa y el carbono almacenado en los bosques.....	15
OBJETIVOS	19
HIPÓTESIS	20
MÉTODOS	21
Área de estudio.....	21
Descripción de especies	24
Obtención de datos en campo.....	31
Medición del volumen total y de madera en los troncos y copas	32
Cálculos de biomasa y carbono a partir de volúmenes y densidad	37
Análisis de la estructura anatómica de corteza y madera de las especies estudiadas ..	39
Análisis estadísticos.....	41
RESULTADOS	43
Variación en el tamaño y la densidad entre especies	43
Biomasa total en el tronco, la copa, en todo el individuo y biomasa porcentual de la copa (respecto de todo el individuo).....	44
Correlación de biomasa total del individuo y longitud total.....	49
Comparación de biomاسas de las seis especies	50
Carbono capturado en los individuos de las especies estudiadas y comparación con otro estudio.....	50
Biomasa porcentual de la corteza en el tronco, la copa y en el individuo completo.....	52
Densidad de la corteza y la madera de las seis especies	54
Correlación entre la densidad y el volumen de la corteza y la madera	57

Correlación entre densidad y tejidos de madera y corteza de las seis especies estudiadas	58
DISCUSIÓN	61
Biomasa aérea y almacenamiento de carbono en las especies estudiadas	61
Almacenamiento de carbono en las copas de los árboles.....	63
Biomasa porcentual de la corteza.....	65
Densidad de madera y corteza en copa y tronco.....	66
Relación entre la densidad de los tejidos y su estructura anatómica	68
Adecuado manejo forestal e integración a REDD+	68
CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Emisiones antropogénicas de GEI totales (Gt CO ₂ eq/año) en 2004.....	6
Figura 2. Emisiones de GEI por sector en México.....	7
Figura 3. Mapa de densidad de carbono sobre del suelo de los bosques de México.....	9
Figura 4. Flujos (f) y almacenes (a) de carbono en un ecosistema forestal.....	13
Figura 5. Regiones anatómicas de la corteza, origen ontogénico y funciones de cada región.....	14
Figura 6. Ubicación general del Ejido Felipe Carrillo Puerto.....	21
Figura 7. Mapa de vegetación del ejido Felipe Carrillo Puerto, con cartas topográficas de INEGI.	23
Figura 8. Vegetación de selva baja subperennifolia del Ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo.....	23
Figura 9. Tipos de vegetación en el Ejido Felipe Carrillo Puerto.....	24
Figura 10. Descripción de <i>Cordia dodecandra</i>	25
Figura 11. Descripción de <i>Lysiloma latisiliquum</i>	26
Figura 12. Descripción de <i>Manilkara zapota</i>	27
Figura 13. Descripción de <i>Metopium brownei</i>	28
Figura 14. Descripción de <i>Swartzia cubensis</i>	29
Figura 15. Descripción de <i>Swietenia macrophylla</i>	30
Figura 16. Vista transversal de los troncos de las seis especies estudiadas.....	32
Figura 17. División del tronco para la obtención de perímetros y muestras por segmento.....	33
Figura 18. Estructura de la copa con ramas primarias y secundarias.....	35
Figura 19. Medición de la copa.....	35
Figura 20. Secado de muestras en horno.....	38
Figura 21. Pesado de muestras secas de cada individuo por especie.....	38
Figura 22. Muestras de las seis especies y ablandamiento de cinco de ellas.....	40

Figura 23. Montado de muestras en resina sintética.....	40
Figura 24. Gráfica de barras con desviación estándar de la biomasa en el tronco, biomasa total en la copa, biomasa total en individuos completos y biomasa porcentual de la copa (respecto de todo el individuo, de las seis especies muestreadas	48
Figura 25. Histograma de la biomasa porcentual de la copa.....	49
Figura 26. Correlación entre biomasa total del individuo y su altura.....	49
Figura 27. Carbono por individuo en cada una de las seis especies.....	51
Figura 28. Gráfica de barras con desviación estándar de la biomasa porcentual de corteza en el tronco, biomasa porcentual de corteza en la copa y biomasa porcentual de corteza en un individuo completo de las seis especies muestreadas.....	54
Figura 29. Gráfica de barras para una ANOVA de dos vías de la densidad de la corteza de las seis especies muestreadas.....	57
Figura 30. Correlación entre la densidad y el volumen de la corteza y madera en todos los individuos medidos.....	58
Figura 31. Cortes transversales de madera de las seis especies estudiadas ordenadas de menor a mayor contenido de fibras.....	59
Figura 32. Cortes transversales de corteza de las seis especies estudiadas ordenadas de menor a mayor contenido de fibras.....	60

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Especies utilizadas para cuantificar el carbono en la madera y la corteza de la selva mediana subperennifolia de Carrillo Puerto.....	31
Tabla 2. Medias, desviación estándar e intervalo de la longitud total (m), de las seis especies muestreadas.....	43
Tabla 3. Medias, desviación estándar e intervalo de la densidad (g/cm ³) de la corteza y madera del tronco y copa de las seis especies muestreadas.....	44
Tabla 4. ANOVA comparando la biomasa en el tronco, la copa, el individuo completo y en el área porcentual de la copa.....	45
Tabla 5. Media y grupos homogéneos, resultado de la prueba de Tukey para la biomasa total (kg) del tronco, copa, porcentaje de la copa e individuos completos de las seis especies.....	47
Tabla 6. Comparación de la biomasa calculada con el método de este estudio y otra ecuación	50
Tabla 7. Porcentaje de carbono en la madera y contenido medio de carbono por individuo según la especie.....	51
Tabla 8. ANOVA para comparar la proporción de biomasa de la corteza en las diferentes regiones de un árbol.....	52
Tabla 9. Media, intervalo de confianza y grupos homogéneos resultado de la prueba de Tukey para la proporción de corteza en el tronco, copa e individuo completo.....	53
Tabla 10. Densidad de la corteza y de la madera difirieron entre especies y regiones de la planta.....	55
Tabla 11. Grupos homogéneos con la prueba post-hoc de Tukey para la densidad (g/cm ³) de la corteza y madera para el tronco y copa.....	56

RESUMEN

Los bosques han cobrado gran importancia como sumideros de carbono en las últimas décadas. Las cuantificaciones actuales no toman en cuenta la diferencia en tasas de acumulación y descomposición en madera y corteza de los tallos. En este estudio, cuantificamos el almacenamiento de carbono en corteza y madera de seis especies arbóreas de la selva mediana subperennifolia del Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono (CONAFOR-REDD+) del Ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. Las especies estudiadas fueron: *Swietenia macrophylla*, *Swartzia cubensis*, *Metopium brownei*, *Manilkara zapota*, *Lysiloma latisiliquum* y *Cordia dodecandra*. Se cuantificó la biomasa en el tronco y en la copa de 10 individuos adultos. La biomasa fue calculada a partir del volumen de corteza, madera y de la densidad de estos tejidos. El volumen fue estimado considerando cilindros en los tallos y midiendo el perímetro y grosor de la corteza. En las copas se tomó en cuenta el número de bifurcaciones y su tamaño. Se compararon los resultados obtenidos de biomasa aérea con una ecuación alométrica utilizada para este mismo sitio. El carbono almacenado se calculó con los valores del porcentaje de carbono en la madera fueron tomados de Bautista-Hernández y Torres- Pérez (2003). Además, se hizo un análisis de la estructura anatómica de la corteza y madera de las especies estudiadas, haciendo una correlación entre la cantidad de fibras con la densidad de ambos tejidos. Los resultados obtendios mostraron el papel fundamental que tienen los bosques en la captura de carbono. Con una aplicación de un método detallado para la estimación de bioasa en individuos completos (tronco y copa; madera y corteza). Aunado a la importante contribución de la copa, que se ha subestimado en muchos modelos. De igual manera, resaltar la participación en la corteza, en donde se hizo notar la mayor contribución en la copa. Para la densidad, hay ligeras variaciones entre la corteza y madera, mostrando una asociación a la estructura anatómica de los tejidos. La información obtenida fue crucial para llenar y refinar nuestros conocimientos sobre la cantidad y la distribución del carbono almacenado en las plantas. Con ello, se contribuirá en programas como REDD+. También se podrá continuar y mejorar el manejo sustentable y justo de la selva y para el mantenimiento de la biodiversidad.

Palabras clave: biomasa, copa, tronco, flujos y REDD.

ABSTRACT

The forest has become an important key as a carbon sink in recent years. The present quantifications do not take into account the differences in rates of accumulation and decomposition in wood and bark of the stems. In this study, we quantified the carbon storage in bark and wood of the six species of a medium... forest of the Carbon Intensive Monitoring Site (CONAFORD-REDD+), of the Ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. The six species were: *Swietenia macrophylla*, *Swartzia cubensis*, *Metopium brownei*, *Manilkara zapota*, *Lysiloma latisiliquum* y *Cordia dodecandra*. The biomass was quantified in the trunk and in the canopy of 10 adult trees. The biomass was calculated starting from the volumen of the bark, wood and the density of these tissues. The volumen was estimated considering cylinders in the stems and measuring the perimeter and the thickness of the bark. In the canopy, the number of bifurcations and their size were take into account. The results of the aerial biomass were compared with an allometric equation used for this site. Then, the stored carbon was calculated with porcentaje values of the carbon in the wood from Bautista- Hernández and Torres-Pérez (2003). In addition, an anatomical analysis was made of the structure of the bark and wood from the six species, making a correlation between the amount of fibers with the density of both tissues. The results showed the fundamental role of the forest in the carbon sequestration. Besides the application of a detailed method for estimating the biomass in a complete individual (trunk and canopy, wood and bark). In addition to the importance contribution of the canopy, which has been underestimated in many models. Similarly, highlight the participation of the bark, where it was a greatest contribution in the crown. In the case of the density, there are slight variations between bark and wood, showing an association to the anatomical structure of the tissues. All this information was crucial to fill and refine our knowledge about the amount and the distribution of carbon stored in the plants. Also, it will contribute to programs such as REDD+ and continue to improve the sustainable and fair management of the forest and the maintenance of biodiversity.

Key words: biomass, canopy, trunk, flows and REDD+

INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la biomasa para estimar el carbono capturado es un procedimiento clave para entender los flujos de carbono y su dinámica en un bosque. Este entendimiento se vuelve cada vez más urgente en el contexto del cambio climático (Xu *et al.*, 2016), pues permite implementar estrategias de manejo de los bosques (Bonan, 2008).

El cambio climático es uno de los problemas ecológicos más severos a nivel global (IPCC, 2013; Dávalos *et al.*, 2008). Este problema es propiciado por el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del uso de energías fósiles (56.6%), el cambio de uso de suelo, la deforestación (17.3%), y los procesos de la industria del cemento (14.3%) (Gay y Martínez, 1995; Masera *et al.*, 1995; IPCC, 2007). Los gases de efecto invernadero tienen un gran potencial de producir cambios significativos en el sistema tierra-océano-atmósfera, lo que afecta los patrones de circulación de la atmósfera y los ciclos biogeoquímicos (IPCC, 2000; Dávalos *et al.*, 2008). Entre los gases de efecto invernadero más importantes se encuentra el dióxido de carbono.

El dióxido de carbono puede ser capturado por los bosques, quienes lo convierten en biomasa vegetal. Por ello, se dice que los bosques mitigan el cambio climático (Masera, 1996). Tomando en cuenta que la biomasa de los árboles vivos es uno de los reservorios de carbono más importantes dentro de un bosque (Woodburry *et al.*, 2007), es crucial tener un monitoreo y manejo sustentable de estos árboles. Uno de los aspectos más importantes de este monitoreo es el relativo al registro de la biomasa forestal, misma que no sólo permite determinar la cantidad de carbono almacenado en la vegetación, sino que liga este reservorio de carbono con cambios demográficos (Dávalos *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2014).

Las estimaciones de biomasa en los bosques se basan principalmente en los tallos y se emplean diferentes métodos para su cálculo. Cuando no se dispone de alguna información acerca de la biomasa de los individuos estudiados, se utiliza el método directo de estimación de biomasa. Este procedimiento es una estimación lenta, costosa y destructiva en la que se estima la biomasa directamente.

Comúnmente se emplea este procedimiento con el objetivo de desarrollar ecuaciones de regresión para predecir la biomasa de estas especies con base en el tamaño de la planta (p.e. diámetro a la altura del pecho) que permiten así un método indirecto (Picard *et al.*, 2012). Otros métodos indirectos incluyen el uso de factores de expansión (Brown, 1997).

En general, en las estimaciones de biomasa suele considerarse únicamente a los tallos principales como un todo compuesto únicamente por tejido tipo madera (Chave *et al.*, 2005; Litton, *et al.*, 2007). Sin embargo, los tallos están regionalizados en madera (tejido dentro del cámbium vascular) y corteza (tejidos fuera del cámbium vascular, Curtis y Schnek, 2008). La corteza es un tejido que por lo tanto suele despreciarse en estas estimaciones. Esto ha tenido como consecuencia que no se ha determinado con precisión su contribución a la biomasa de la vegetación leñosa (materia orgánica que existe por arriba del suelo: hojas, varas, ramas, tronco y corteza, Brown, 1997). Esto es particularmente cierto a nivel de las copas, región donde por cierto la biomasa de las copas suele calcularse de manera muy gruesa (Goodman *et al.*, 2014; Henry *et al.*, 2010). Si consideramos que es en esta región de las plantas donde la corteza suele tener una mayor proporción que la madera, es muy probable que hayamos estado subestimando de manera muy significativa las cantidades de corteza en los bosques. Esto puede representar un problema porque la corteza es un tejido de naturaleza física y química diferente de la madera y de las hojas, que seguramente participa de manera distinta en los flujos de carbono (Romero, 2014).

Por ello, es crucial determinar cuánta corteza hay en un bosque, relacionar cualitativamente la estructura anatómica tanto de corteza como de madera con el almacenamiento de carbono, no sólo en el tronco sino también en la copa de los árboles, en específico en las ramas. En este trabajo se abordan justamente estos aspectos y se cuantifica el carbono y la biomasa almacenada tanto en la corteza y madera, desde el tronco hasta la copa de un árbol. Esto es lo que nos llevará a refinar nuestro entendimiento y la modelación de los flujos de carbono en los bosques, replantear algunos aspectos del manejo sustentable de estos sistemas

(FAO, 2015), y contribuir a las políticas que buscan mitigar el cambio climático a través del mercado de carbono (Goodman *et al.*, 2014).

Con el objetivo de reducir las emisiones por deforestación se han creado programas a nivel global como el Proyecto Fortalecimiento REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques) y Cooperación Sur-Sur. Dentro de estos programas se busca la conservación y el manejo sustentable de los bosques, maximizando el almacenamiento de carbono (CONAFOR, 2015; Baker *et al.*, 2014). Precisamente el sitio estudiado en este proyecto, el Ejido Felipe Carrillo Puerto en Quintana Roo, es uno de los sitios incluidos en esta red a través del Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono que se ha instalado en el ejido. El trabajo que aquí se presenta se une a este esfuerzo de la CONAFOR enfocado en la modelación de los flujos de carbono en un ecosistema tan importante y tan representativo de México como es la selva mediana subperennifolia. De esta forma, este trabajo es el primero en cuantificar y comparar la cantidad de biomasa en carbono en la corteza y madera de individuos completos de seis especies de la selva mediana subperennifolia de Q. Roo, las cuales son de gran importancia en toda península por su abundancia y por su aprovechamiento forestal.

MARCO TEÓRICO

1. Cambio global/ cambio climático

El cambio climático, uno de los fenómenos atmosféricos de mayor importancia en la actualidad, ha sido definido por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por las siglas en inglés) como: “todas aquellas variaciones atmosféricas, identificadas a lo largo del tiempo, sin importar si su origen es natural o como consecuencia de las actividades humanas” (IPCC, 2007). Este cambio se ha relacionado de forma directa con el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI). Las principales emisiones son de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFCs), hexafluoruro de azufre (SF_6) (Duarte *et al.*, 2006; IPCC, 2007). La mayor emisión de estos gases recae en el CO_2 , el cual es emitido principalmente por el sector energético debido al uso de energías fósiles (56.6%), por deforestación y desintegración de la biomasa, (17.3%), y por los procesos de la industria (14.3%). A nivel mundial, el crecimiento económico y poblacional siguen siendo los impulsores del aumento de las emisiones de CO_2 , principal GEI (Gay y Martínez, 1995; Masera *et al.*, 1995; IPCC, 2014) (Figura 1).

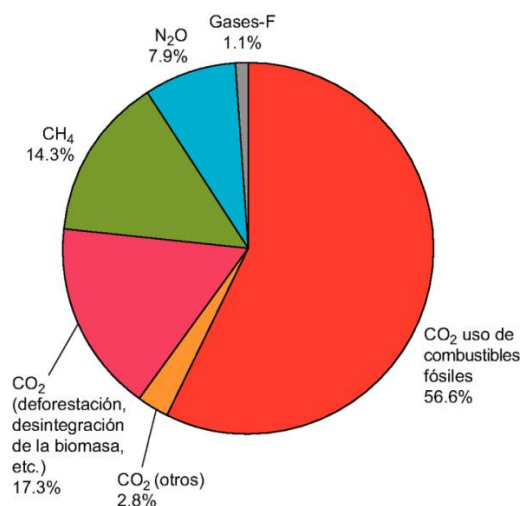


Figura 1. Emisiones antropogénicas de GEI totales (Gt CO_2 eq/año) en 2004. Fuente: IPCC, 2007.

A nivel mundial, los mayores productores de emisiones de CO₂ de energías fósiles y otros procesos industriales son China (23%), Estados Unidos (19%), la Unión Europea (13%), India (6%), la Federación Rusa (6%), Japón (4%) y Canadá (2%). México se ubica en el doceavo lugar a nivel global, contribuyendo con alrededor del 1.4% de emisiones de CO₂ (CDIAC, 2014; SEMARNAT, 2012).

En el 2012, en México el CO₂ fue emitido por el sector energético con 67.3% del total, la agricultura con 12.3%, los procesos industriales con 8.2%, cambio en el uso de suelo y silvicultura con 6.3% y desechos con 5.9% (Figura 2). Esta distribución de porcentajes de CO₂ se atribuye a diversos factores económicos nacionales e internacionales, nuevos acuerdos y reformas de los sectores, aunado a nuevas tecnologías, esquemas de producción y demanda de servicios y bienes (SEMARNAT *et al.*, 2013).

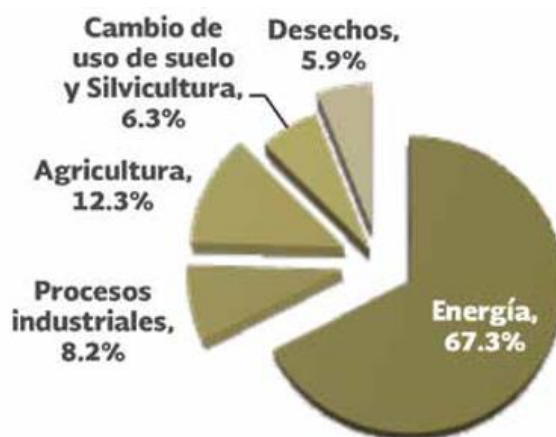


Figura 2. Emisiones de GEI por sector en México. Fuente: SEMARNAT, 2012.

Los altos porcentajes de CO₂ emitidos por los diferentes sectores tienen grandes repercusiones en los ecosistemas, pues generan una pérdida de la riqueza biótica del planeta, la erosión de los suelos, cambios en los patrones de evapotranspiración, contaminación, entre otros (Mander *et al.*, 1998). Por ello, es importante analizar el ciclo del carbono y las posibles repercusiones que ha tenido el aumento del CO₂, para reducir o mitigar los efectos del cambio climático.

En el ciclo del carbono se involucran grandes flujos naturales de intercambio entre la atmósfera, el océano y la superficie terrestre. Es indispensable entender lo que sucede en cada uno de estos sistemas con el objetivo de determinar si funcionan como fuente o como sumidero de carbono (Schulze *et al.*, 2000).

2. Los bosques como sumideros de carbono.

Un sumidero es “cualquier proceso, actividad o mecanismo que absorbe o remueve un GEI, aerosol o un precursor de un GEI”, siendo los bosques los principales sumideros de carbono (UNFCCC⁴, 2014). Los bosques también están sujetos a la perturbación natural o humana (deforestación, incendio, enfermedades, etc.), con la que experimentan un proceso de pérdida y funcionan como una fuente de carbono en donde la tasa de emisión supera a la de productividad primaria neta (Rojo *et al.*, 2003; Brown, 2010; Sloan *et al.*, 2014). La deforestación genera 2 000 millones de toneladas de carbono al año, representando el 25% del total de las emisiones de CO₂ (FAO, 2005).

A pesar de que pueden funcionar como fuentes de carbono, los bosques son principalmente un sumidero vital de este elemento. Los bosques cubren casi el 30% de la superficie mundial y se estima que contienen 450 billones de toneladas de carbono, un equivalente a 45 años de combustión de energía fósil (Pardos, 2010; WHRC, 2015). Al sumar el carbono en la biomasa aérea de los bosques, en la madera muerta, los desechos forestales y el suelo, los bosques son un sistema que almacena 50% más del carbono presente en la atmósfera. Otra cifra que ilustra la importancia de los bosques es que aproximadamente el 80% del flujo de carbono ocurre en estos ambientes. De este porcentaje, un 60% del carbono acumulado está en regiones tropicales, un 17% en bosques templados y 23% en los bosques boreales (Piao *et al.*, 2005; Nijiniik, 2009). Estas cifras muestran la gravedad de perder estos reservorios de carbono a nivel mundial a través de la degradación de los bosques, sobre todo los tropicales.

Las condiciones geográficas y climáticas de México permiten que el 70.2% de la extensión total del territorio presente casi todos los tipos de vegetación natural terrestre, y que México cuente con el 12% de los bosques del mundo. De esa superficie con vegetación natural terrestre, 32% lo conforman ecosistemas forestales arbolados, como bosques y selvas (Torres, 2004). Aunque todos los sistemas de vegetación en el país contribuyen de manera importante al almacenamiento de carbono, los ambientes tropicales constituyen el componente más significativo (Román *et al.*, 2014). Los estados con mayor superficie de selvas húmedas y subhúmedas son Campeche (3 941 145 ha), Quintana Roo (3 527 809 ha), Yucatán (2 690 945 ha), Oaxaca (2 657 000 ha), Chiapas (1 972 139 ha), Veracruz (839 867 ha) y Tabasco (190 915 ha) (SEMARNAT, 2012). De acuerdo con el mapa presentado por Cartus y colaboradores (2014), las mayores densidades de carbono (>50 tC/ha) en México se encuentran en la península de Yucatán, en donde los bosques tropicales son los que tienen los valores más altos de densidad de carbono por encima del suelo (> 50 tC/ha) (Figura. 3).

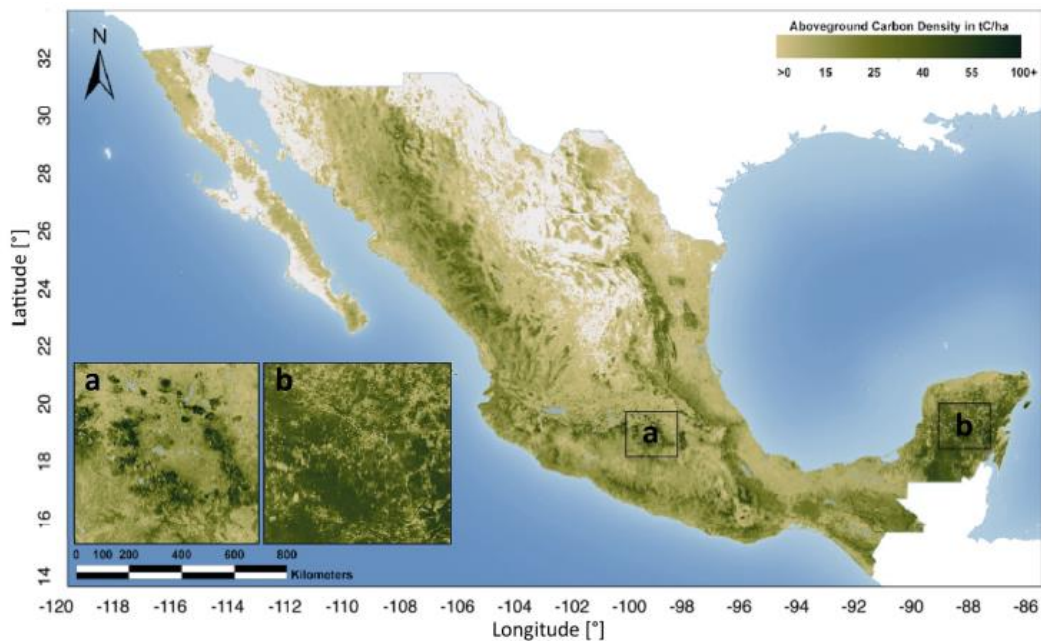


Figura 3. Mapa de densidad de carbono sobre del suelo de los bosques de México. Tomado de Cartus *et al.*, 2014.

Dentro de la Península de Yucatán, Quintana Roo posee cerca de 3.6 millones de hectáreas de selva, área que equivale al 84% de la superficie estatal. La vegetación con mayor superficie es la selva mediana subperennifolia con aproximadamente 2.92 millones de hectáreas (INEGI, 2010). El sureste de Quintana Roo y el sureste de Campeche poseen el segundo porcentaje más alto de cubierta forestal en México, pero también tienen el porcentaje más alto de deforestación (Urquiza-Hass *et al.*, 2007). Debido a sus cambios graduales y temporales en la estructura y composición florística, es importante estudiar el ritmo de cambio de biomasa forestal y por lo tanto del almacenamiento de carbono (Chave *et al.*, 2004; Silver *et al.*, 2000). El apropiado manejo de los bosques en estas zonas puede asegurar que la gran cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea perdure por muchos años (Acosta *et al.*, 2011).

3. Políticas internacionales y nacionales sobre el manejo de carbono

En la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, se empezó a discutir la importancia de los bosques como reservorios de carbono. Pero pasaron 18 años antes de que en la COP I de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), en Montreal, se incorporara el tema de la emisión de GEIs derivada de la deforestación. En parte, esta discusión ocurrió gracias a la presión ejercida por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Ocho años más tarde, se empezó a implementar estrategias, mecanismos y programas para dar solución a estas emisiones por deforestación (Chapela y Mendoza, 2014).

Uno de los esfuerzos para reducir las emisiones por deforestación que se ha aplicado a gran escala es REDD+ (Reducción de Emisiones producto de la Deforestación y la Degradación de los bosques). REDD+ es un programa creado por la CMNUCC que ayuda a aquellos países que estén dispuestos a reducir las emisiones por deforestación y degradación de los bosques, contribuyendo con la conservación, su manejo sustentable y el mejoramiento de inventarios de carbono, aspectos que son representados con el signo “+” (REDD, 2014). México ha reconocido la importancia de conservar, manejar y restaurar los ecosistemas

forestales y con ello los bienes y servicios ambientales que ofrecen. Ha desarrollado para ello la Estrategia Nacional para la Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los bosques, misma que plantea políticas, medidas y acciones para un desarrollo sustentable (ENAREDD+, 2014).

El manejo forestal sostenible que se realiza en México promueve el desarrollo de las comunidades locales y conservación de la biodiversidad y captura de carbono (Klooster y Masera, 2000). Un factor clave en el manejo forestal en el país ha sido el papel de las comunidades en este manejo. Un caso paradigmático de esto es el manejo forestal comunitario que ha caracterizado a Quintana Roo desde los 80s. El buen estado de conservación de los bosques que se ha alcanzado en diversos ejidos en el estado y el hecho de contar con la más baja tasa de deforestación en el sureste está fuertemente asociado a este manejo comunitario (Bray y Velázquez, 2009). Además de la reducción en la deforestación, este manejo contribuye significativamente a la conservación de la biodiversidad (Bray *et al.*, 2005; Coomes *et al.*, 2008; Bray y Velázquez, 2009).

El Ejido Felipe Carrillo Puerto en Quintana Roo ha manejado sus bosques de forma comunitaria desde la década de los 80s (Merino *et al.*, 1997). Más recientemente, este ejido se involucró en una colaboración con la CONAFOR, a través del Proyecto Fortalecimiento REDD+ y Cooperación Sur-Sur, para montar un sitio de monitoreo intensivo del carbono con el apoyo de la asociación civil U'yoolche. Este sitio forma parte de una red de sitios que tienen por objetivo brindar información sobre los flujos de carbono forestal, crear empleos para los habitantes en el monitoreo comunitario de bosques, ayudar a fortalecer las capacidades de gestión y la toma de decisiones de otros proyectos de la comunidad y generar un pago por servicios ambientales en la categoría de captura de carbono (Reyes, 2013, REDD+ y CONAFOR, 2014).

4. Fotosíntesis y producción de biomasa.

La captura y almacenamiento de carbono se da a partir de un proceso biológico muy importante, la fotosíntesis. Este proceso produce energía bioquímica para realizar diferentes procesos fisiológicos. Durante la fotosíntesis, el CO₂ atmosférico se transporta al interior de las plantas a través de los estomas de las hojas. Una de las reacciones ocurre en los tilacoides, en donde la energía solar es usada para formar ATP y NADPH. Otra parte de las reacciones fotoquímicas se destina a la fijación y reducción química del CO₂ (Raven *et al.*, 2005; Nijnik, 2009). Una parte del carbono se canaliza a la producción de celulosa, lignina, azúcares, grasas, almidones, proteínas, resinas, fenoles, entre otras sustancias. Otra parte se libera a la atmósfera por medio de la respiración aerobia (Concha *et al.*, 2007).

Los carbohidratos producidos por fotosíntesis son utilizados para la generación de biomasa de raíces, tronco y copa. Cada especie asigna más o menos carbono para producir biomasa en la parte aérea o subterránea (Castellanos *et al.*, 1991). Esta biomasa vegetal se reintegrará a la atmósfera a través del proceso de descomposición a diferente velocidad dependiendo de las características químicas del tejido (Figura 4).

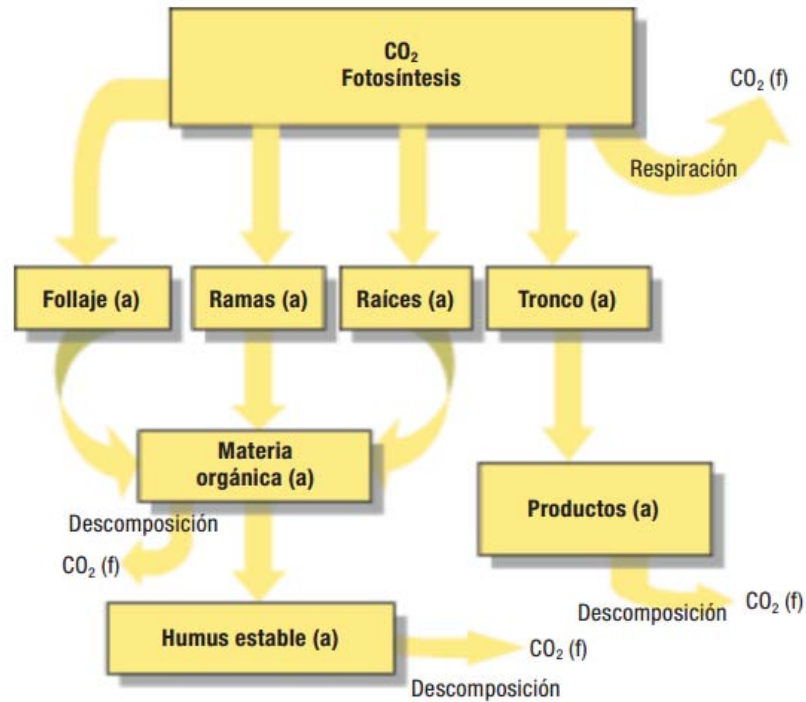


Figura 4. Flujos (f) y almacenes (a) de carbono en un ecosistema forestal. Fuente: Ordoñez y Masera, 2001.

5. Madera y corteza como reservorios de carbono

Las características químicas de los tejidos vegetales definen el tiempo en que su carbono permanece en forma orgánica. En el caso de la madera, el carbono puede permanecer en esta forma por un periodo muy largo de tiempo (Lamlom y Savidge, 2003). La madera contiene diversos elementos, pero en general se asume que el 50% de su biomasa seca está constituida por carbono (IPCC, 2014). De hecho, este valor es el utilizado por diferentes cuerpos científicos como la IPCC al momento de hacer cálculos de carbono a partir de la biomasa seca (Thomas y Malczewski, 2007). No obstante, el contenido de carbono en la madera varía dependiendo de la especie en un rango de 47-59%, según las características químicas y anatómicas únicas de cada madera (Savidge, 2000; Lamlom y Savidge, 2003). Además de la variación entre especies, el contenido de carbono puede variar dentro un individuo, ya que la madera juvenil producida en la copa

tiene también diferentes características de la madera madura producida en el tronco (Zobel y Sprague, 1998).

En contraste con la madera, se conoce muy poco sobre la cantidad de biomasa y carbono que se almacena en la corteza, el otro gran componente de los tallos leñosos. La corteza es un tejido complejo que se ubica fuera del cámbium vascular, y que incluye al floema secundario, córtex, peridermis o un conjunto de peridermis conocido como ritidoma (Figura 5). En general, toda las cortezas protegen a los tallos de diferentes agentes, almacenan agua, almidón y otros componentes, y también pueden fotosintetizar (Rosell *et al.*, 2015). Las características físicas y estructurales de la corteza están influidas por la distribución y proporción de diferentes tejidos, aspectos que se relacionan estrechamente con las diversas funciones de la corteza (Rosell *et al.*, 2013; Romero 2014, Aschan y Pfanz, 2003). Esta diferente proporción de tejidos de pared gruesa (fibras) o de pared delgada (parénquima) afectan la densidad de la corteza y tendrán por lo tanto un efecto en el almacenamiento de carbono en esta región del tronco y ramas.

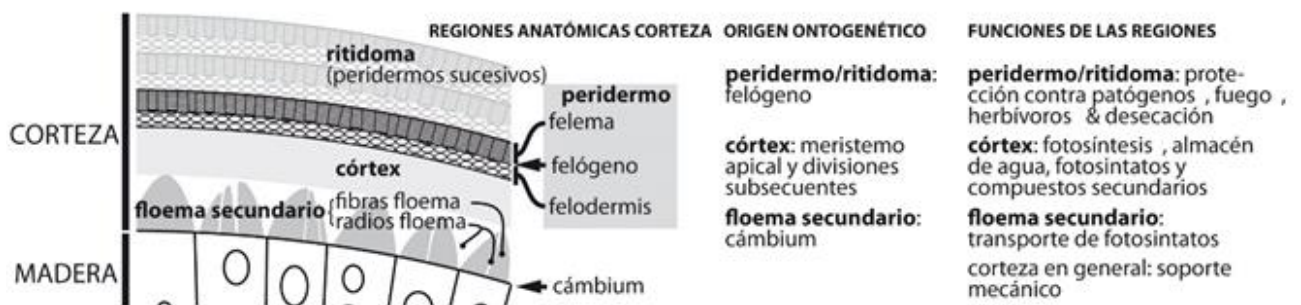


Figura 5. Regiones anatómicas de la corteza, origen ontogénico y funciones de cada región. Fuente: Rosell *et al.*, 2014.

Como resultado de su gran proporción de tejido vivo, la corteza tiene tasas de descomposición, y probablemente también de producción, muy distintas a las de la madera (Cornwell *et al.*, 2009). En un proceso de recambio constante, la corteza deposita biomasa en el suelo, misma que probablemente aporta un porcentaje mayor de nitrógeno y otros nutrientes en comparación con la madera. Es por ello

que resulta necesario entender las diferentes aportaciones que tiene la corteza en los diferentes ciclos biogeoquímicos de los ecosistemas, principalmente en el ciclo del carbono.

6. Estimación de la biomasa y el carbono almacenado en los bosques

La cantidad de biomasa en un bosque es de suma importancia para valorar los cambios en la estructura de este ecosistema (Brown, 1997). La biomasa forestal integra diversos procesos funcionales y atributos estructurales vinculando la productividad neta del bosque, el área basal, la altura y la densidad de la madera. A su vez, esta biomasa está relacionada con el equilibrio entre la tasa a la que se ha producido la madera (crecimiento) y la tasa de pérdida (mortalidad) (Pan *et al.*, 2013; Lasky *et al.*, 2014). La cuantificación de la biomasa en un bosque se centra en la estimación de la biomasa aérea (Clark y Clark, 2000). La biomasa aérea está conformada por varios componentes de diferente complejidad y accesibilidad, incluyendo los troncos principales, las ramas y las hojas. La distribución de la biomasa en estos diferentes componentes permite conocer cómo factores como la luz, y la disponibilidad de agua influyen en el crecimiento de los distintos órganos de una planta y el aumento de los reservorios de carbono (Colter *et al.*, 2003; Rodríguez, 2013). El cálculo de la biomasa aérea de un bosque por unidad de superficie y al igual que su productividad, proporcionan un estimado de la cantidad potencial de carbono que se puede emitir si un bosque es destruido (Vashum y Jayakumar, 2012).

Para estimar la cantidad de carbono que un sistema forestal almacena, se pueden aplicar dos tipos de métodos: los directos o destructivos y los indirectos (Acosta *et al.*, 2011). Los métodos destructivos o directos miden la biomasa directamente a partir del peso seco de los árboles en el campo. Este método es el más exacto para estimar la biomasa seca sobre el suelo, pero toma mucho tiempo, por lo que generalmente se aplica en áreas pequeñas, y además causa la mortalidad de los árboles. Este método es el utilizado para generar ecuaciones alométricas que relacionen el tamaño de la planta (usualmente el diámetro a la altura del pecho)

con la biomasa seca (Henry *et al.*, 2010). Estas ecuaciones son generadas por especie para ser aplicadas como parte de métodos indirectos.

Los métodos indirectos o no destructivos implican medir parámetros como el volumen del tronco, diámetros a la altura del pecho, la altura del árbol y la densidad específica de la madera para estimar la biomasa aérea. En uno de estos métodos indirectos, se multiplica la biomasa de los troncos por el llamado factor de expansión de biomasa (FEB), para obtener la biomasa aérea total. El FEB es un coeficiente que expande el volumen comercial del troncos para obtener la biomasa total del árbol, con el fin de tomar en cuenta componentes no comerciales de la biomasa como las ramas y el follaje (Somogyi *et al.*, 2006; FAO, 2014). El FEB refleja una proporción directa entre la biomasa aérea total y la biomasa del tronco. Los FEB difieren entre especies, y con las condiciones ambientales, la densidad, entre otras variables, y generalmente se utilizan cuando únicamente se cuenta con datos del volumen del tronco (Aalade *et al.*, 2006; Silva- Arredondo *et al.*, 2010).

Otro método indirecto consiste en utilizar ecuaciones alométricas para calcular la biomasa aérea. Estas ecuaciones suelen ser específicas por especie y se pueden usar para generar cuadros de biomasa (Brown *et al.*, 1989; Acosta *et al.*, 2011). Este es el método indirecto más común por ser menos costoso y requerir de un menor tiempo. A pesar de ello, aplicar estas ecuaciones puede ser poco preciso debido a que en muchos casos se utilizan ecuaciones desarrolladas en un tipo de región y se aplican a otras regiones donde hay una composición de especies distinta (Goodman *et al.*, 2014).

Entre estos dos tipos de métodos se puede desarrollar uno semi-destructivo. Este método combina las mediciones directas de ciertas partes del árbol, el volumen y la densidad de las muestras tomadas de diferentes partes del árbol. Con este método, las mediciones que se hacen en el campo no afectan de manera significativa al tronco ni a las ramas principales, pues se enfocan en las ramas pequeñas. Para la medición de biomasa se toma la biomasa fresca cortada y la no cortada. Las alícuotas cortadas de madera y corteza se mandan al laboratorio, para obtener de manera directa la biomasa seca. Por su parte, en la fracción no

cortada se realizan mediciones de volumen para después estimar su biomasa a través de la densidad. Después de esto, se aplican diferentes ecuaciones para obtener la biomasa de las diferentes regiones del árbol (Picard *et al.*, 2012). Este método semi-destructivo permite no sólo tomar en cuenta el tronco, sino también la copa. Los pocos estudios estimando la biomasa de la copa apuntan a que esta región tiene un aporte muy significativo al ciclo del carbono. El método semi-destructivo puede ser uno de los métodos más útiles, ya que se obtienen datos directos de los individuos de diferentes especies a estudiar y se pueden extrapolar los resultados a más árboles de esas especies.

En este trabajo se aplicó un método semi-destructivo como el descrito arriba, mismo que permitió tomar en cuenta la copa de manera muy detallada, desde la primera bifurcación después del tronco hasta la punta de las ramas. Existen otros métodos que permiten tomar en cuenta la copa, pero tienden a ser muy generales. Por ejemplo, para el caso del factor de expansión de biomasa, se toman en cuenta las ramas con diámetro mínimo comercial (12 cm) y algunas otras ramas mayores (Chávez-Pascual *et al.*, 2013). La copa también es tomada en cuenta al aplicar ecuaciones alométricas de biomasa, pero estas ecuaciones no informan cuánta biomasa hay en el tronco y en la copa por separado (Ordoñez y Rivera., 2015; Rojas y Villers, 2008). Es por ello que entendemos poco de los patrones de asignación de carbono a la copa por parte de la planta y de la biomasa almacenada en esta parte de un árbol. El método semi-destructivo aplicado aquí permite hacer esta estimación de biomasa en la copa y comparar el carbono almacenado ahí con el presente en el tronco.

Para el cálculo de la biomasa aérea hay otras técnicas muy recientes que involucran sensores remotos. Estas técnicas están basadas en la interacción de la radiación electromagnética con la tierra, dando un análisis cuantitativo de la información digital extraída de estas interacciones (Hall *et al.*, 2011). Estas técnicas pueden ser una herramienta de gran rapidez y baja en costos, ya que permiten extraer los contenidos captados e interpolarlos espacialmente a lo largo de la masa forestal de muestreos extensos. Para México todavía no se cuenta con

una metodología estándar de valoración de carbono capturado por sensores remotos y por lo tanto es costosa e ineficiente en esta etapa inicial (Torres, 2011). En general, es recomendable combinar las mediciones hechas por sensores remotos con mediciones hechas en el campo. En este contexto, las mediciones de campo se utilizan para desarrollar modelos predictivos de la biomasa o validar los resultados obtenidos con los sensores remotos (Salamanca, 2007).

Este trabajo aborda aspectos de cuantificación de carbono y biomasa aérea en especies comunes de la selva mediana subperennifolia de Quintana Roo. En este esfuerzo se cuantifica la biomasa en los troncos y en las copas utilizando un método semi-destrutivo con mediciones detalladas. Además de realizar una contribución metodológica para tomar en cuenta a la copa, este trabajo es pionero al cuantificar la biomasa y el carbono almacenado en la corteza de varias especies arbóreas. Esta biomasa se relaciona con la estructura anatómica de la corteza a través de la densidad. De esta forma es posible entender si una mayor o menor captura de carbono en la corteza está dada por la cantidad de tejido (volumen) o por las características anatómicas del tejido. Los resultados de este trabajo han enfatizado que la corteza es un tejido muy significativo en los tallos que debería ser tomado en cuenta de forma explícita en la estimación de carbono en los bosques. Dadas esta contribución a la biomasa y las diferencias estructurales y químicas entre la corteza y la madera, resulta muy importante incorporar estos datos sobre la cantidad de corteza en los modelos de flujo de carbono de los sistemas tropicales de alta diversidad. Así mismo, esta información puede ayudar a mejorar los diversos servicios ambientales que se generan en esta área y el pago que se obtenga por concepto de éstos.

OBJETIVOS

✓ **General**

Estimar el contenido de carbono a partir de la biomasa aérea en la madera y la corteza de un individuo completo de seis especies comunes y de importancia comercial en la selva mediana subperennifolia del Ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo

✓ **Particulares**

- Calcular la biomasa aérea y el carbono almacenado a nivel de todo el individuo, diferenciando entre copa y tronco.
- Comparar la biomasa aérea en cada una de las 6 especies estudiadas.
- Cuantificar la biomasa aérea en individuos completos diferenciando entre madera y corteza y entre el tronco principal y las ramas de la copa.
- Analizar la contribución de la corteza y la copa al almacenamiento de carbono y al ciclo del carbono.
- Realizar una comparación entre la densidad de la corteza y la madera entre las seis especies estudiadas, tomando en cuenta la región de la planta a la que pertenece el tejido (copa o tronco).
- Comparar cualitativamente la estructura de la corteza y madera de las especies estudiadas en cuanto al contenido de fibras y células de pared gruesa y relacionar este contenido con la densidad.

HIPÓTESIS

- Se espera que la corteza ocupe una proporción significativa de la biomasa total de la planta, por lo que la corteza representará un importante reservorio de carbono.
- Dado que la corteza alcanza su máxima proporción en los tallos jóvenes (Romero, 2013), este tejido será muy significativo en cuanto a biomasa y carbono almacenado a nivel de las ramas de las copas y será menos importante a nivel de los troncos.
- En términos de la relación densidad y estructura anatómica de la corteza, se espera que las especies de mayor densidad contengan un mayor número de fibras y una fracción más reducida de tejido parenquimatoso.
- Se espera que especies con corteza más gruesa, y por lo tanto mayor volumen en la planta, presenten una biomasa más alta para este tejido, y una menor densidad.

MÉTODOS

Área de estudio

❖ Ubicación geográfica

El área de estudio se localiza en la porción centro oriente del estado de Quintana Roo, en la parte sur del municipio de Felipe Carrillo Puerto. Esta zona es denominada localmente como “La Zona Maya”. El área de estudio colinda al norte con el Ejido X-Maben y Anexos, así como con el ejido Tres Reyes; al sur colinda con los Ejidos Santa Isabel, X-Conha, así como con X-hazil y Anexos; al este colinda con la Reserva de la Biosfera Sian Ka’an y al oeste con terrenos particulares, y con el Ejido San Antonio Nuevo.

El ejido cuenta con 47, 223 hectáreas y se ubica en las siguientes coordenadas geográficas: Longitud Oeste: 87° 52' 00" y 88° 06' 00" y Latitud Norte: 19° 42' 00" y 19° 25' 00", y tiene una altitud promedio de 30 msnm (Figura 6).

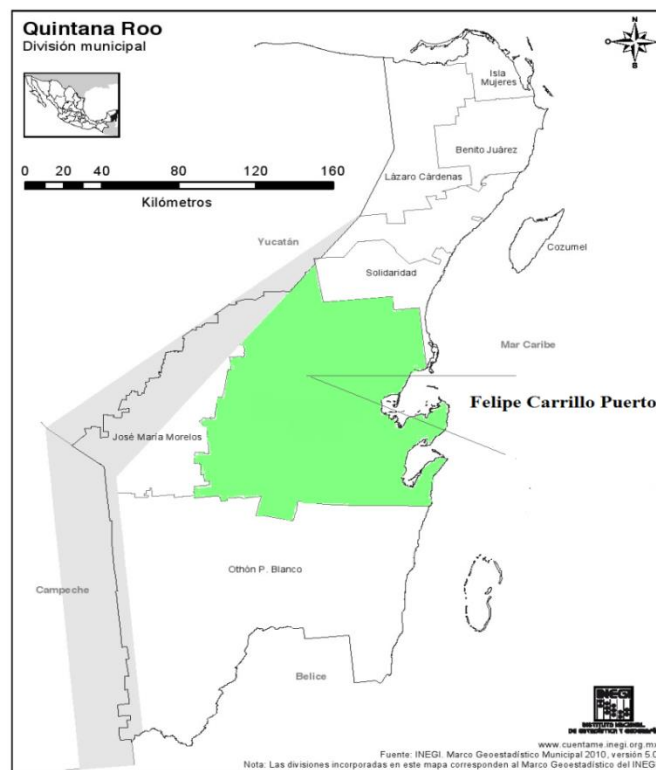


Figura 6. Ubicación general del Ejido Felipe Carrillo Puerto. Fuente: INEGI. Marco Geoestadístico Municipal 2010, versión 5.0.

❖ **Clima**

En el área de estudio, el clima, de acuerdo a la clasificación de Köppen, modificada por García, es Aw1 (x')(i') cálido subhúmedo con lluvias de verano, con un porcentaje de lluvia invernal mayor de 10.2%. La precipitación media anual es de 1,158 mm, y se presenta con mayor intensidad de mayo a octubre con un rango de 10.3 mm a 18.5 mm (INAFED, 2010).

❖ **Edafología**

Esta zona se caracteriza por tener suelos poco profundos con elevada pedregosidad. El suelo tiene roca calcárea, es rico en materia orgánica y presenta un pH de neutro a alcalino. El suelo que predomina en el área de estudio es el leptosol con un 60.28%, seguido de luvisol con 11.33%, el arenosol con 7.21% y un 9.49% de otros suelos (INEGI, 2009; Arreola y Cituk, 2011).

❖ **Hidrografía**

El estado de Quintana Roo, se divide en dos regiones hidrológicas, Yucatán Norte y Yucatán Este, al que pertenece la zona de estudio. Esta área cuenta algunas lagunas, cenotes y zonas de bajos inundables, sobre todo en la parte que colinda con la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an (Arreola y Cituk, 2011).

❖ **Uso de suelo y vegetación**

La vegetación de esta zona es principalmente selva (81.01%), pero también se encuentra tular, manglar y áreas sin vegetación. En el área forestal del Ejido Felipe Carrillo Puerto se mantiene una composición de especies nativas. La selva mediana subperennifolia con vegetación primaria es la más abundante en el sitio (Figura 7). Las características principales de esta selva son la altura promedio de más de 15 metros, con una densidad de copa arriba del 80%. Algunas especies pierden el follaje de marzo a mayo. Las especies que cubren el dosel son el Chicozapote (*Manilkara zapota*), Chechen (*Metopium brownei*), Caoba (*Swietenia macrophylla*), entre otras, cubriendo todas estas especies el 56% del área forestal trabajada (INEGI, 2009; Arreola y Cituk, 2011) (Figura 8).

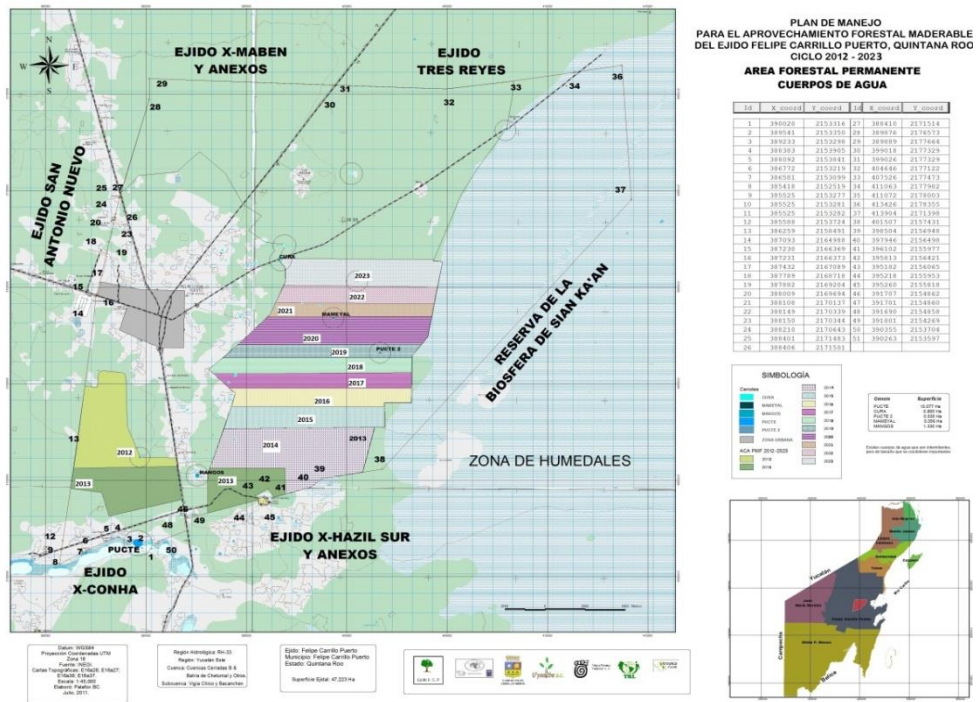


Figura 7. Mapa de vegetación del ejido Felipe Carrillo Puerto, con cartas topográficas de INEGI. Fuente: Arreola y Cituk, 2011.



Figura 8. Vegetación de selva baja subperennifolia del Ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo.

Además de la selva mediana subperennifolia con vegetación primaria, hay un porcentaje importante de este tipo de selva con vegetación secundaria (26%). En esta vegetación se encuentran especies como: Chechen (*Metopium browneii*), Tzalam (*Lysiloma latisiliquum*), Katalox (*Swartzia cubensis*), entre otras. Los otros tipos de vegetación son el estrato arbustivo, herbáceo y la selva baja inundable o espinosa, con una gran variedad de especies (Figura 9).

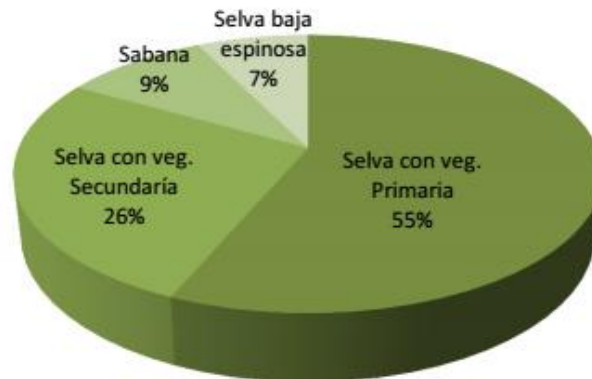


Figura 9. Tipos de vegetación en el Ejido Felipe Carrillo Puerto. Fuente: Plan de Manejo Forestal, 2011.

Por último, en el caso de la fauna del área, se cuenta con una gran variedad de especies. Se tienen registrados 628 vertebrados terrestres, de los cuales 21 son anfibios, 93 son reptiles, 421 aves y 93 mamíferos terrestres (U'yo'olché, 2007; Arreola y Cituk, 2011).

Descripción de especies

Las descripciones de las seis especies estudiadas se realizaron con base en Pennington y Sarukhán (2005) y Vázquez-Yanes y colaboradores (1999).

***Cordia dodecandra* A. DC.**

Pertenece a la familia Boraginaceae y su nombre común es Siricote. El árbol puede llegar hasta 30 m de altura, con un tronco derecho, ramas ascendentes, copa redondeada o piramidal y muy densa. Las hojas están dispuestas en espiral, están más presentes en las puntas de las ramas y son simples. Van de 5.5 x 4 a 12 x 9 cm, tienen una nervadura prominente en el envés y son muy ásperas, especialmente en el haz. Sus flores son actinomorfas, de color amarillo-rojizo o anaranjado y florece todo el año. Los frutos son drupas y maduran todo el año.

Se distribuye desde el Golfo en la zona centro de Veracruz, pasando por la depresión central de Chiapas y la península de Yucatán. Está presente en las selvas medianas subperennifolias y subcaducifolias, en suelos pobres y someros. Se distribuye a una altitud de hasta 500 m. Es una especie que posee madera oscura y se utiliza en la producción de algunos instrumentos y chapas. Su producción a gran escala es difícil por el diámetro pequeño que presenta. Los frutos son comestibles y se utilizan para elaborar jaleas o dulces (Figura,10).

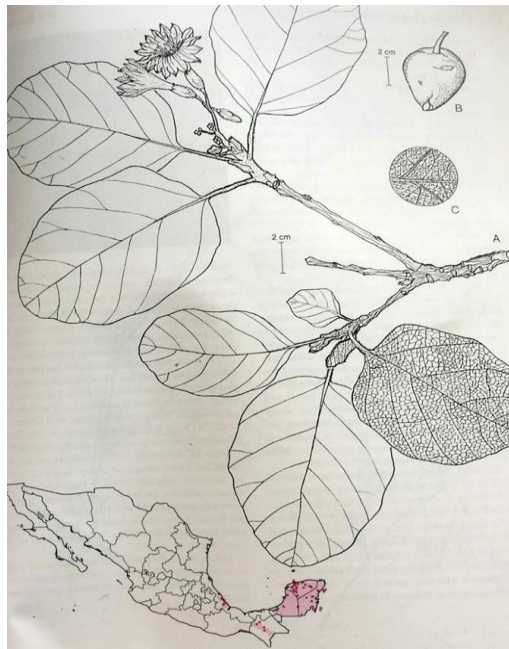


Figura 10. *Cordia dodecandra*. A, rama con flores; B, fruto. Tomado de: Pennintong y Sarukhán (2005).

***Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth**

Pertenece a la familia Leguminosae Mimosoideae y su nombre común es Tzalam. El árbol puede ser de hasta 20 m de altura, su tronco es derecho y con ramas ascendentes. Cuenta con una copa redondeada y sus hojas están dispuestas en espiral, bipinnadas de 11 a 20 cm de largo incluyendo el peciolo. Pierden sus hojas en temporada de sequía. Sus flores se presentan en cabezuelas solitarias o agrupadas y florece de marzo a junio. Los frutos son vainas aplanadas de color moreno oscuro.

La distribución está restringida al norte de Chiapas, en la Selva Lacandona, Tabasco y la península de Yucatán. Se desarrolla en suelos sedimentarios y forma parte de selvas medianas subperennifolias y subcaducifolias e incluso en las caducifolias del norte de Yucatán. Sus altitudes de desarrollo son menores de 150 m. Esta especie se usa para la fabricación de duela, lambrí y parquet (Figura 11).

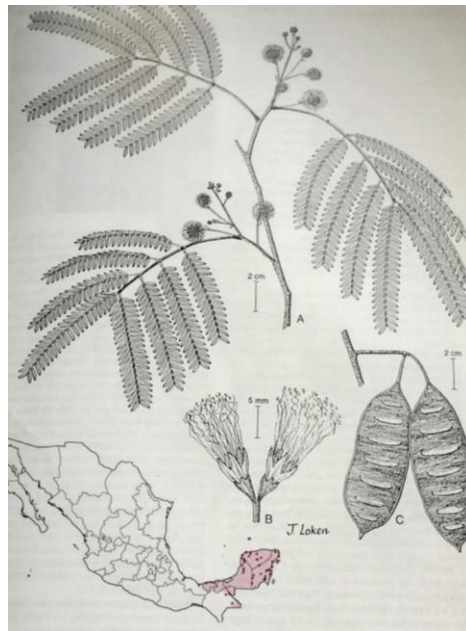


Figura 11 *Lysiloma latisiliquum*. A, rama con flores; B, flores; C, vainas. Tomado de: Pennintong y Sarukhán (2005).

***Manilkara zapota* (L.) P. Royen**

De la familia Sapotaceae, esta especie es conocida como Chicozapote. Es un árbol perennifolio de 25 a 30 m, a veces hasta 45 m de altura. Presenta algunas cicatrices diagonales de las incisiones para obtener el látex. Su copa es amplia, densa e irregular, sus hojas están dispuestas en espiral, aglomeradas en las puntas de las ramas de 5.5 x 2 a 18 x 7 cm. Las flores son solitarias a veces aglomeradas en la punta. Florece de junio a octubre. Sus frutos son bayas de hasta 10 cm de diámetro con cáscara morena, generalmente contiene 5 semillas aplastadas. Los frutos que están inmaduros tienen un poco más de látex y su maduración es de enero a abril.

Tiene una distribución en la vertiente del Golfo, en San Luis Potosí, el norte de Veracruz y Puebla. En el sur de la república va del norte de Chiapas y en la península de Yucatán. También está presente en el Istmo de Tehuantepec. Es codominante en selvas altas perennifolias y medianas subperennifolias, con una altitud de 800 m. Su principal uso era la extracción del látex, que se utilizaba en la fabricación del chicle. Pero esta explotación chiclera ha disminuido notablemente. Actualmente también se aprovecha para el consumo de sus frutos y por último, hay una notable extracción de su madera por su dureza y resistencia (Figura12).

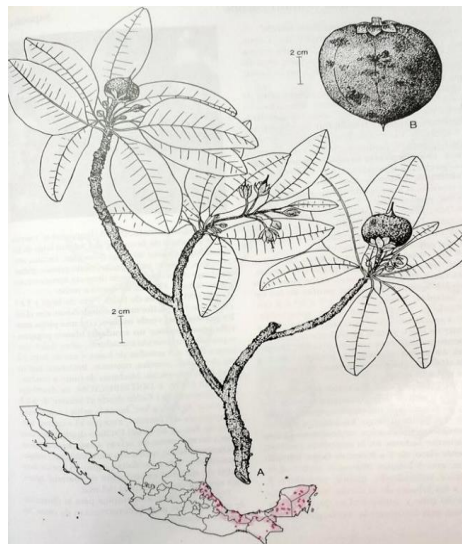


Figura 12. *Manilkara zapota*. A, rama con flores; B, baya. Tomado de: Pennintong y Sarukhán (2005).

***Metopium brownei* (Jacq.) Urb.**

Pertenece a la familia Anacardiaceae, su nombre común es Chechén negro. Es un árbol caducifolio, de 12 a 25 m de altura. Su copa es irregular con ramas ascendentes y hojas en espiral, imparipinnadas, de 20 a 30 cm de largo incluyendo el peciolo. Es una especie dioica, con panículas masculinas y femeninas axilares, de hasta 20 cm de largo. Sus flores son actinomorfas y florece de marzo a principios de mayo. Sus frutos con bayas, ovoides, carnosas y de color amarillas o naranja oscuro. Éstos maduran de mayo a octubre.

Se encuentra restringida a la vertiente del Golfo, desde el sur de Veracruz hasta la Península de Yucatán, donde es especialmente abundante. Suele presentar un mayor número de individuos en el estrato medio y superior de las selvas medianas subperennifolias y subcaducifolias. Funge como especie primaria en algunas selvas sabaneras, expuestas a quemadas periódicas. Se utiliza principalmente en la producción forestal, en especial para la fabricación de duelas y pisos. Al estar en contacto con la resina de esta especie se pueden producir afecciones dérmicas (Figura 13).



Figura 13. *Metopium brownei*. A, rama con flores; B, flor masculina; C, flor femenina.

Tomado de: Pennintong y Sarukhán (2005).

***Swartzia cubensis* (Britton & Wills) Standl.**

Pertenece a la familia Leguminosae Faboideae y su nombre popular es Katalox. Es un árbol de hasta 40 m de alto. Sus ramas están anacaladadas y sus hojas están dispuestas en espiral, imparinnadas de 10 a 25 cm. Pierde sus hojas en la temporadas seca, entre febrero y mayo. Sus flores son ignomorfas y se presentan en racimos de hasta 10 cm de largo, floreciendo de febrero a mayo. Sus frutos son en forma de vainas globosas a ovoides y flexibles.

Se distribuye exclusivamente en el noreste de Chiapas, Tabasco y Yucatán. Forma parte selvas medianas subcaducilias y subperennifolia. En la industria forestal, debido a su madera muy pesada y dura, se utiliza en postes y durmientes para ferrocarril. Algunas veces se utiliza para chapas y lambrines (Figura 14).



Figura 14. *Swartzia cubensis*. A, inflorescencia; B, flor masculina; C, rama con hojas.

Tomado de: Pennintong y Sarukhán (2005).

***Swietenia macrophylla* King**

Esta especie pertenece a la familia Meliaceae. Conocida popularmente como Caoba. Árbol perennifolio o caducifolio de 35 a 50 m de altura. El tronco es ligeramente acanalado y puede presentar contrafuertes. Tiene una copa abierta y pocas ramas gruesas ascendentes. Sus hojas son alternas, paripinnadas o imparipinnadas, de 5 x 2 a 12 x 15 cm. Es una especie monoica de flores pequeñas y florece en los meses de abril a junio. Los frutos son cápsulas leñosas, café rojizas y sus semillas son amargas y astringentes. Los frutos maduran de noviembre a enero.

En México, se distribuye del norte de Veracruz al sur de la Península de Yucatán. Se desarrolla preferentemente en suelos de origen calizo o aluvial. Forma parte de selvas altas o medianas, perennifolias y subperennifolias. Las zonas donde se tiene registrado una mayor talla es en la zona lacandona, Chiapas. La altitud en la que se distribuye va de 0 a 750 m. Es una especie pilar para la industria forestal tropical mexicana y su madera es sumamente apreciada y se exporta en grandes cantidades (Figura 15).



Figura 15. *Swietenia macrophylla*. A. rama con flores; B, cápsula. Tomado de: Pennintong y Sarukhán (2005).

Obtención de datos en campo

Para realizar la cuantificación de la biomasa en la corteza y madera de los árboles comunes de la selva mediana subperennifolia del Ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, se realizaron mediciones y toma de muestras en el área de corta del año 2016. Esta área comparte sus principales especies con el Sitio de Monitoreo Intensivo de la CONAFOR, por lo que los resultados en este trabajo son extrapolables a dicho sitio. Cabe mencionar que se optó por trabajar en el área de corta, en lugar de en el sitio de monitoreo, porque los árboles derribados permitieron el acceso a las copas para una medición detallada, además de un muestreo destructivo.

Se trabajó con seis especies que fueron derribadas con fines comerciales, mismas que incluyeron a cinco de las especies más comunes de la selva mediana subperennifolia, más *C. dodecandra*, una especie adicional de gran importancia comercial en el sitio y menos común que las otras (Tabla 1 y Figura 16). Las seis especies representan el 19.9% de la densidad de la vegetación en el área de estudio (Plan de Manejo Forestal, 2011).

Nombre científico	Nombre común
<i>Cordia dodecandra</i> A. DC.	Siricote
<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth	Tzalam
<i>Manilkara zapota</i> (L.) P. Royen	Chicozapote
<i>Metopium brownei</i> (Jacq.) Urb.	Chechen
<i>Swartzia cubensis</i> (Britton & Wills) Stadl.	Katalox
<i>Swietenia macrophylla</i> King	Caoba

Tabla 1. Especies utilizadas para cuantificar el carbono en la madera y la corteza de la selva mediana subperennifolia de Carrillo Puerto.

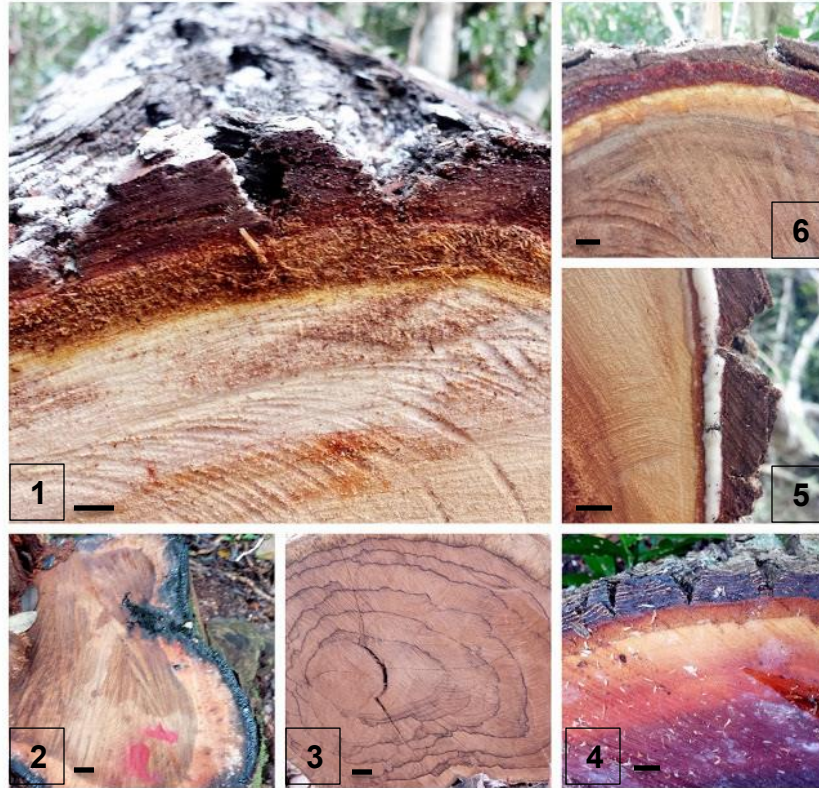


Figura 16. Vista transversal de los troncos de las seis especies estudiadas, *S. macrophylla* (1), *M. brownei* (2), *C.dodecandra* (3), *S.cubensis* (4), *M.zapota* (5), y *L. latisiliquum* (6). La escala equivale a 0.6 cm en (1), 0.2 cm en (2), (3) y (6), 0.3 cm en (4), y 0.4 cm en (5).

Medición del volumen total y de madera en los troncos y copas

Para la estimación de la biomasa, se utilizó un método semidestructivo en el que se calculó primero el volumen y luego la densidad para obtener la biomasa seca. En total se midieron 10 individuos adultos para cada una de las seis especies. Las muestras y mediciones se tomaron tanto en la corteza como en la madera, a lo largo del tronco y en la copa del árbol como se describe a continuación.

➤ Tronco:

Se dividió el tronco en varios segmentos, de acuerdo a lo sugerido por Wehenkel y colaboradores (2012), con ligeras modificaciones a su protocolo. Se dividió el tronco en segmentos a una distancia desde la base de 0-30, 30-60, 60-90, 90-

130cm, y después a cada metro hasta llegar a la parte donde el tronco se unía con las ramas principales y se iniciaba la copa (horcadura del árbol). En la base y en el ápice de cada segmento se midió el perímetro y se obtuvo una muestra de corteza para mediciones de su grosor y sudensidad (Figura 17). También se tomaron muestras de madera en la base y punta del tronco y en la parte media para el cálculo de densidad.

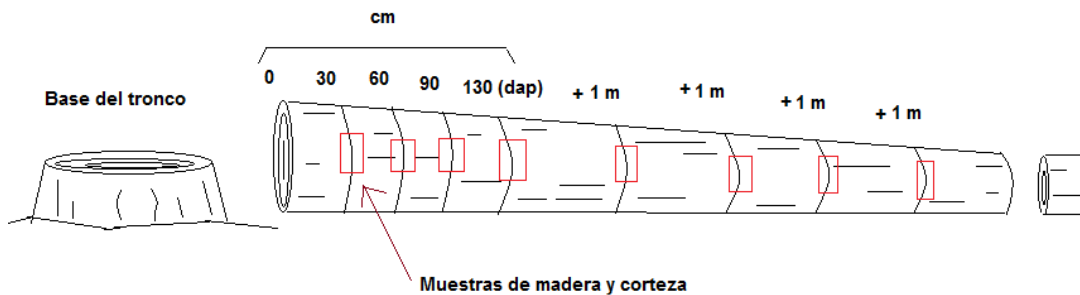


Figura 17. División del tronco para la obtención de perímetros y muestras por segmento.

A partir del perímetro total en cada punto se calculó el diámetro sobre la corteza. Con base en el diámetro basal y apical, además de la longitud de cada segmento, se calculó el volumen total de cada segmento utilizando la fórmula del frustum (Wehenkel *et al.*, 2012)

$$V = \frac{1}{3} \pi * h \left((d_b/2)^2 + (d_b * d_a)/4 + \left(\frac{d_a}{2}\right)^2 \right)$$

Dónde,

V= Volumen de cada segmento en un individuo

h= longitud del segmento

d_b =diámetro basal del segmento

d_a =diámetro apical del segmento

Posteriormente se sumaron los volúmenes totales de todos los segmentos para estimar el volumen total del tronco. Además, a partir del diámetro sobre la corteza,

se calculó el diámetro de la madera restando dos veces el grosor de corteza. Este grosor fue medido con un vernier digital. El diámetro de la madera en cada punto y la longitud de los segmentos fueron utilizados para calcular el volumen de madera en cada segmento y el volumen total de la madera del tronco. El volumen de corteza se calculó a partir de la diferencia entre el volumen total y el volumen de madera.

➤ **Copa:**

Para la estimación de la biomasa en la copa, se diseñó un nuevo método para la estimación del volumen. Para la estimación tanto de biomasa como de carbono solo se tomaron en cuenta las ramas de la copa. Primero, se analizó la estructura arquitectónica general de la copa para localizar la rama principal y de más fácil acceso para seguir su camino hasta la parte apical de la copa. Sobre el eje central de esta rama principal llamada primaria de ahora en adelante, se definieron segmentos entre puntos de ramificación. Se tomaron así medidas del perímetro basal y apical de cada segmento, además de su longitud, para idealizar el segmento como un cono truncado y calcular su volumen total. En el punto medio de cada segmento se tomaron muestras de corteza para las mediciones de grosor y densidad. Se tomaron también muestras de madera en el segmento más basal y apical de la copa (rama principal), y en un segmento intermedio de esta rama primaria para mediciones de densidad. Además de tomar estas mediciones sobre esta rama primaria de la copa, se tomaron los perímetros basales de todas las ramas partiendo de este eje, denominadas de ahora en adelante ramas secundarias. Conforme se fueron tomando las muestras y medidas se realizó un esquema de respaldo en papel de la rama primaria y todas las secundarias partiendo de ésta (Figura 18 y 19).

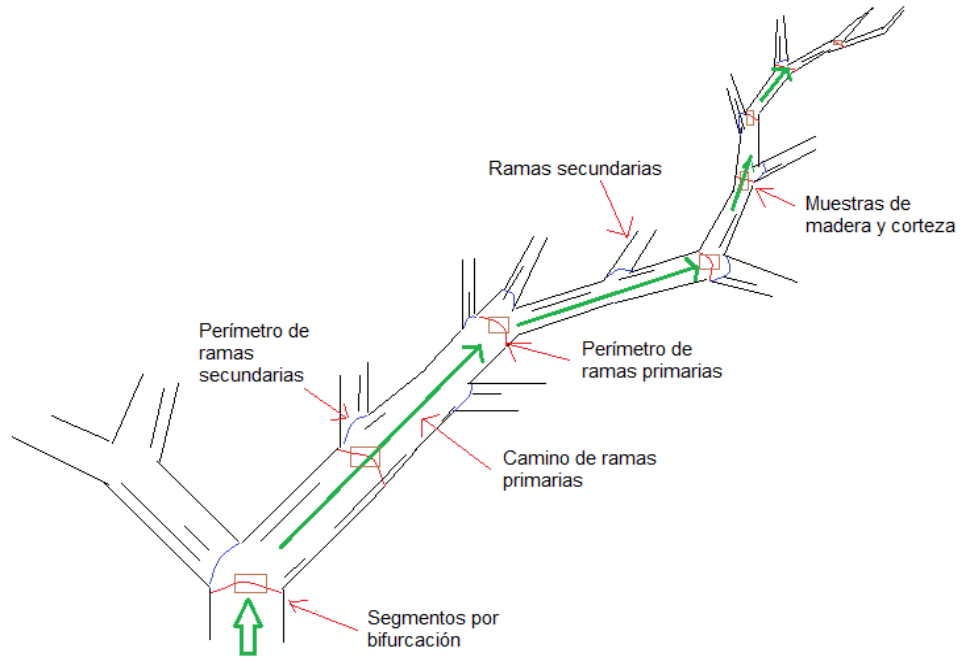


Figura 18. Estructura de la copa con ramas primarias y secundarias.



Figura 19. Medición de la copa.

Para calcular el volumen de los cilindros que conformaron la rama primaria, se utilizó la fórmula del cono truncado.

$$V = \frac{1}{3}\pi * h (R^2 + r^2 + (R * r))$$

Dónde,

V= volumen cm³

R=radio basal sobre la corteza del segmento

r=radio apical sobre la corteza del segmento

Posteriormente, los volúmenes sobre la corteza de los segmentos se sumaron para estimar el volumen total sobre la corteza de la rama primaria.

Para calcular el volumen total sobre la corteza de la copa, incluyendo las ramas secundarias, además de la rama primaria, se utilizó un procedimiento iterativo y modelos de regresión lineal. La idea general fue interpolar el volumen de toda una rama secundaria a partir de su diámetro basal sobre la corteza. Para esta interpolación se utilizaron modelos de regresión lineal que relacionaron el volumen acumulado y el diámetro basal a partir de todos los datos de los segmentos provenientes de las ramas primarias de todos los individuos medidos para una misma especie.

De forma general, el procedimiento consistió en los siguientes pasos iterativos. Primero, se reunieron todos los datos de los segmentos más terminales de todas las ramas primarias, mismos que contaron con un dato de volumen y uno de diámetro basal. Se ajustó una regresión lineal con base en estos datos que permitió calcular el volumen asociado a una rama secundaria terminal para la que solamente se contaba con el diámetro basal (y no un dato de volumen por ser secundaria). Cabe resaltar que solamente se infirió el volumen para ramas con diámetros dentro del rango de datos en la regresión, i.e., no se extrapolaron volúmenes, solamente se interpolaron. Los datos de volumen inferido para las ramas secundarias terminales se sumaron a los volúmenes de los segmentos de

la rama primaria que estaban unidas físicamente a dichas ramas secundarias. Estos volúmenes acumulados (sumados) sirvieron de base para la siguiente iteración que conjuntó datos de volumen acumulado y diámetro para las ramas por debajo de las terminales. Se repitió el proceso de ajustar una regresión para interpolar el volumen acumulado de las ramas secundarias con diámetro dentro del intervalo utilizado para la regresión. Nuevamente, los valores inferidos de volumen se sumaron a los observados en los segmentos de ramas principales correspondientes. El proceso fue repetido hasta completar la estimación del volumen acumulado de las dos o tres ramas unidas al tronco. El volumen acumulado de estas ramas fue sumado para calcular el volumen acumulado de toda la copa de cada individuo.

El procedimiento iterativo descrito anteriormente se repitió considerando el diámetro de la madera con el objetivo de calcular el volumen acumulado de este tejido. Para ello, se restó dos veces el grosor de la corteza al diámetro medido por encima de la corteza en campo. De esta forma, se calculó el volumen acumulado de madera en la copa. El volumen acumulado de corteza consistió en la diferencia entre el volumen acumulado total y el volumen acumulado de la madera. Estas estimaciones de volumen tanto del tronco como la copa sirvieron de base para el cálculo de la biomasa.

Cálculos de biomasa y carbono a partir de volúmenes y densidad

Para el cálculo de la biomasa seca de madera y corteza fue necesario estimar la densidad de estos tejidos. Para ello, se utilizaron los fragmentos de madera y corteza colectados tanto en el tronco como en la copa. La densidad se calculó como:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde,

ρ = densidad (g /cm³)

m= masa seca (g)

V= volumen fresco (cm³)

Para determinar el volumen fresco y el peso seco de una muestra, se cortaron cubos de madera o corteza de aproximadamente 0.5 cm por lado. El volumen fresco de estos cubos se midió por desplazamiento de agua usando una balanza analítica (Williamson & Wiemann 2010; Figura 15).

Para obtener la biomasa seca, se secaron estos mismos cubos en un horno a 90°C durante dos días (Figura 20), y se pesaron en una balanza para obtener el peso seco (Figura 21).



Figura 20. Secado de muestras en horno.



Figura 21. Pesado de muestras secas de cada individuo por especie.

Los datos colectados en la base, la punta y la parte media del tronco para la densidad de madera y corteza por individuo fueron promediados, al igual que los tres datos para la copa. Posteriormente se multiplicó esta densidad por el volumen de copa o de tronco para estimar la biomasa seca para cada individuo. Se hizo la conversión de la biomasa para obtener el carbono almacenado por especie y los valores del porcentaje de carbono en la madera fueron tomados de Bautista-Hernández y Torres- Pérez (2003). Esta información no estuvo disponible para *C. dodecandra*, por lo que para esta especie se utilizó el porcentaje de 50% de carbono en la biomasa (Thomas y Martin, 2012). Para la corteza no se cuenta con datos de porcentaje de carbono en la biomasa. Por ello, se utilizó el mismo porcentaje que para la madera de cada especie al momento de estimar el carbono en la corteza.

Análisis de la estructura anatómica de corteza y madera de las especies estudiadas

La estructura anatómica general de la corteza de las seis especies fue relacionada con aspectos de densidad. Para realizar observaciones de la estructura anatómica se realizaron laminillas delgadas para la toma de fotografías con microscopía de luz. Una muestra pequeña por especie de corteza y madera del tronco fue incluida en PEG (polietilenglicol) por una semana o dos en el caso de *C. dodecandra*. Posteriormente, se obtuvieron cortes en sección transversal de 15-20 μm de grosor con ayuda de un micrótopo de deslizamiento. Los cortes se pusieron en alcohol al 50% y se tiñeron con azul de metileno. El tren de tinción incluyó 30 minutos en azul de metileno, un enjuague de 3-5 minutos en alcohol al 50%, una hora en una solución saturada de safranina, 10-15 min en alcoholes del 50 al 100% y en citrisol. Finalmente, los cortes se montaron con resina sintética (Figura 22 y 23).



Figura 22. Muestras de las seis especies y ablandamiento de cinco de ellas.

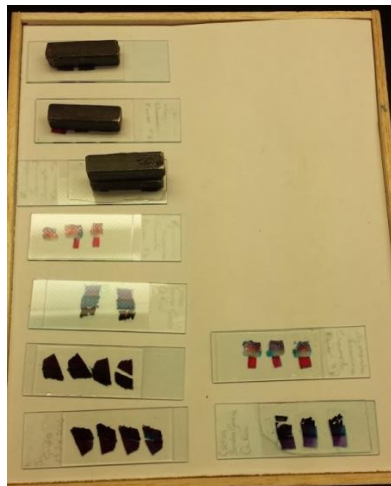


Figura 23. Montado de muestras en resina sintética.

Todos los cortes se observaron al microscopio Axio Zoom-V16 con un objetivo plano a 0.5 X 0.12 FWD a 114mm. Se utilizó una cámara Axio Cam MRCS de 5 megapíxeles, utilizando el programa ZEN (Zeiss, 2014).

Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos estuvieron enfocados en examinar:

- a) La variación entre especies en cuanto a la biomasa total, la biomasa en los troncos y en las copas, y la biomasa porcentual de la copa.
- b) La variación entre especies en cuanto a la biomasa de la corteza en el tronco, en la copa y la biomasa porcentual de la corteza.

Estas comparaciones se realizaron a través de análisis de varianza (ANOVA), verificando los supuestos de estos análisis. Cuando los datos no cumplieron con los supuestos, se aplicó una transformación logarítmica. En el caso de los análisis con porcentajes, se aplicó la transformación de arcoseno (Quinn y Keough, 2002) También se comparó la densidad de corteza o de madera entre especies con un ANOVA de dos vías utilizando la especie y la región de donde procedía la muestra como factores (2 niveles: tronco y copa).

Para examinar relaciones entre variables, se calcularon correlaciones de Pearson. Estas asociaciones se calcularon entre las variables de densidad y volumen tanto de madera como de corteza. También se aplicaron entre el largo total del árbol y la biomasa total considerando en el análisis a todos los individuos. El cálculo de esta última correlación tuvo por objetivo examinar si en general los árboles más altos tuvieron valores más altos de biomasa y si esta tendencia fue parecida para todos los individuos y especies.

De la biomasa total obtenida en este estudio de cada una de las seis especies, se hizo una comparación con la ecuación aplicada por Sánchez y colaboradores (2015) en el Sitio de Monitoreo Instensivo de carbono en Quinata Roo. Esta ecuación alométrica fue utilizada para la estimación de biomasa aérea para individuos con un diámetro a la altura del pecho ≥ 10 cm:

$$y = e^{\left[\beta_0 + \beta_1 \left(\ln(Dn^2 * HT) \right) + \left(\frac{\beta_2}{2} \right) \left(\frac{db}{pm} \right) \right]}$$

Donde,

y= biomasa (kg)

e = exponente

Dn= diámetro a la altura del pecho (cm)

LN= logaritmo natural

db= densidad básica de madera (g/cm^3)

pm= promedio de la densidad básica de la madera a nivel del sitio (g/cm^3)

$\beta_0 = -2.173$

$\beta_1 = 0.868$

$\beta_2 = 0.0939$

Examinaron las diferencias entre los datos obtenidos en este estudio y las estimaciones obtenidas con la ecuación referenciada, todo esto por especie.

Finalmente, se correlacionó la cantidad de fibras y otras células de pared gruesa (p.e. esclereidas) con la densidad tanto de corteza como de madera de las seis especies. Las fotografías de la anatomía de corteza y madera de las diferentes especies fueron ordenadas de menor a mayor contenido de células de pared gruesa utilizando un método visual. Posteriormente se calculó una correlación de Spearman entre esta ordenación y los valores de densidad. Todos los análisis se realizaron en el programa R v.3.1.2 (R Development Core Team, 2014).

RESULTADOS

1. Variación en el tamaño y la densidad entre especies

En total se muestrearon 160 individuos con una longitud total (longitud del tronco más longitud de la rama primaria de la copa) que varió entre 12.64 y 32.43 m (Tabla 2). La especie con mayor longitud promedio fue *S. macrophylla*, mientras que la especie con menor longitud fue *C. dodecandra* (Tabla 2).

Tabla 2. Medias, desviación estándar e intervalo de la longitud total (m), de las seis especies muestreadas.

Espece	Media	Desviación estándar	Intervalo
<i>Swietenia macrophylla</i>	23.59	± 4.99	18.77-32.43
<i>Metopium brownei</i>	20.61	± 2.77	15.37-24.53
<i>Manilkara zapota</i>	18.00	± 2.05	15.42-22.50
<i>Swartzia cubensis</i>	21.89	± 3.61	17.98-30.51
<i>Cordia dodecandra</i>	17.33	± 3.64	12.64-25.64
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	20.52	± 4.61	14.44-28.50

La densidad de la corteza fue muy variable según la especie. La densidad media de la corteza en el tronco varió de 0.371 g/cm³ en *M. brownei* hasta 0.612 g/cm³ en *L. latisiliquum*. Estas especies también mostraron los valores extremos para la densidad de la corteza de la copa con 0.433 g/cm³ para *M. brownei* y 0.697g/cm³ en *L. latisiliquum*.

En el caso de la madera, la variabilidad también fue alta, pero las especies en los extremos fueron distintas que en el caso de la corteza. La especie con mayor densidad media de madera en el tronco fue *S. cubensis* con 0.681 g/cm³ y la de menor densidad *S. macrophylla* con 0.596 g/cm³. En la copa, la especie con

mayor densidad en la madera fue *M. zapota* con 0.705 g/ cm³ y la de menor densidad fue *S. macrophylla* con 0.672g/ cm³ (Tabla 3).

Tabla 3. Medias, desviación estándar e intervalo de la densidad (g/cm³) de la corteza y madera del tronco y copa de las seis especies muestreadas.

Especie	Región		Media	Desviación estándar	Intervalo
<i>Swietenia macrophylla</i>	tronco	corteza	0.615	±0.69	0.499-0.696
		madera	0.656	±0.049	0.578-0.716
	copa	corteza	0.571	±0.115	0.431-0.845
		madera	0.627	±0.053	0.555-0.694
<i>Metopium brownei</i>	tronco	corteza	0.408	±0.031	0.361-0.466
		madera	0.715	±0.096	0.587-0.838
	copa	corteza	0.433	±0.034	0.380-0.499
		madera	0.655	±0.052	0.592-0.757
<i>Manilkara zapota</i>	tronco	corteza	0.587	±0.067	0.508-0.751
		madera	0.747	±0.033	0.690-0.789
	copa	corteza	0.620	±0.078	0.535-0.786
		madera	0.705	±0.032	0.660-0.754
<i>Swartzia cubensis</i>	tronco	corteza	0.572	±0.055	0.512-0.680
		madera	0.749	±0.105	0.541-0.864
	copa	corteza	0.672	±0.105	0.569-0.880
		madera	0.703	±0.052	0.625-0.782
<i>Cordia dodecandra</i>	tronco	corteza	0.517	±0.050	0.157-0.426
		madera	0.709	±0.054	0.622-0.774
	copa	corteza	0.581	±0.119	0.409-0.796
		madera	0.636	±0.077	0.499-0.750
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	tronco	corteza	0.673	±0.086	0.461-0.754
		madera	0.691	±0.073	0.531-0.792
	copa	corteza	0.697	±0.077	0.552-0.789
		madera	0.679	±0.079	0.552-0.796

2. Biomasa total en el tronco, la copa, en todo el individuo y biomasa porcentual de la copa (respecto de todo el individuo)

La biomasa del tronco, de la copa, del individuo total (tronco más copa) y la porcentual de la copa se compararon entre especies a través de una ANOVA con

la especie como un factor con seis niveles. En todos los casos se encontraron diferencias significativas en al menos en una de las seis especies de árboles ($p < 0.001$) (Tabla 4).

Tabla 4. ANOVA comparando la biomasa en el tronco, la copa, el individuo completo (todas estas variables transformadas logarítmicamente), y en el área porcentual de la copa (variable transformadas con arcoseno). *** Indica diferencias significativas $p < 0.001$.

Variable dependiente en ANOVA	Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de p
Biomasa del tronco	Especie	5	0.805	0.161	8.442	5.94 e-06***
	Residuos	54	1.03	0.019		
Biomasa de la copa	Especie	5	4.259	0.851	16.72	5.97e-10***
	Residuos	54	2.751	0.0509		
Biomasa del individuo completo	Especie	5	1.60	0.32	16.93	4.87e-10***
	Residuos	54	1.02	0.0189		
Biomasa porcentual de copa	Especie	5	1.0373	0.207	11.72	1.08e-87***
	Residuos	54	0.956	0.017		

A continuación se muestra el análisis post hoc de Tukey para cada variable dependiente relativa a la biomasa.

Para el tronco, la prueba de Tukey muestra un fuerte traslape entre los grupos homogéneos recuperados. Solamente parece haber diferencias significativas entre las especies en los extremos que incluyen a *S. macrophylla* con el valor más alto de biomasa en el tronco y a *C. dodecandra* con el menor valor (Tabla 5, Figura 24).

En el caso de la copa, el traslape entre los grupos homogéneos de especies es menos fuerte que en el caso del tronco (Tabla 5, Figura 24). El grupo a (*L. latisiliquum*, *S. macrophylla*, *S. cubensis*, *M. zapota*) presentó la mayor biomasa

en la copa, mientras que el grupo *c* formado únicamente por *C. dodecandra* posee la menor. El grupo *b* tuvo fuerte traslape con el grupo *a*.

La prueba de Tukey HSD y los grupos homogéneos para la biomasa total en individuos completos fueron idénticos a los recuperados de la biomasa de la copa (Tabla 5, Figura 24).

En la biomasa porcentual de la copa (respecto de todo el individuo), los grupos homogéneos presentan un fuerte traslape entre ellos (Tabla 5, Figura 24). Las especies que tienden a diferir significativamente del resto del grupo son, *L. latisiliquum* con la mayor proporción de copa respecto del total de la biomasa, y *C. dodecandra* que presenta el menor valor, por lo tanto es la especie con menor proporción

Tabla 5. Media (IC 95%) y grupos homogéneos, resultado de la prueba de Tukey para la biomasa total (kg) del tronco, copa, porcentaje de la copa (respecto de todo el individuo) e individuos completos de las seis especies.

Especie	Biomasa del tronco		Biomasa de la copa				Biomasa del individuo	
	Media (IC 95%)	Grupo	Media (IC 95%)	Grupo	Porcentaje medio (IC 95%)	Grupo	Media (IC 95%)	Grupo
<i>Swietenia macrophylla</i>	1308.08 (1110.5-1505.7)	a	1538.3 (1112.5-1964.2)	a	52.7 (44.4 - 60.9)	bc	2846.4 (2380.7-3312.1)	a
<i>Metopium brownei</i>	793.2 (631.1-955.2)	bc	868.5 (430.5-1306.5)	b	48 (36.5 - 59.5)	cd	1661.8 (1143.8-2179.5)	b
<i>Manilkara zapota</i>	642.5 (537.1-747.8)	bc	1219 (1024.6-1413.5)	ab	65.3 (60.7 - 69.9)	ab	1861.5 (1618.6-2104.4)	ab
<i>Swartzia cubensis</i>	925.8 (736.7-1114.9)	ab	1111.4 (812.4-1410.4)	ab	53.6 (43 - 64.1)	bc	2037.2 (1753.5-2320.8)	ab
<i>Cordia dodecandra</i>	605.2 (465.3-745.1)	c	351.3 (199.9-502.7)	c	35.3 (24.4 - 46.2)	d	956.5 (761.9-1151)	c
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	734.8 (473.9-995.7)	bc	2279.8 (1258.9-3300.6)	a	74.28 (68.1 - 80.5)	a	3014.6 (1874.3-4154.9)	a

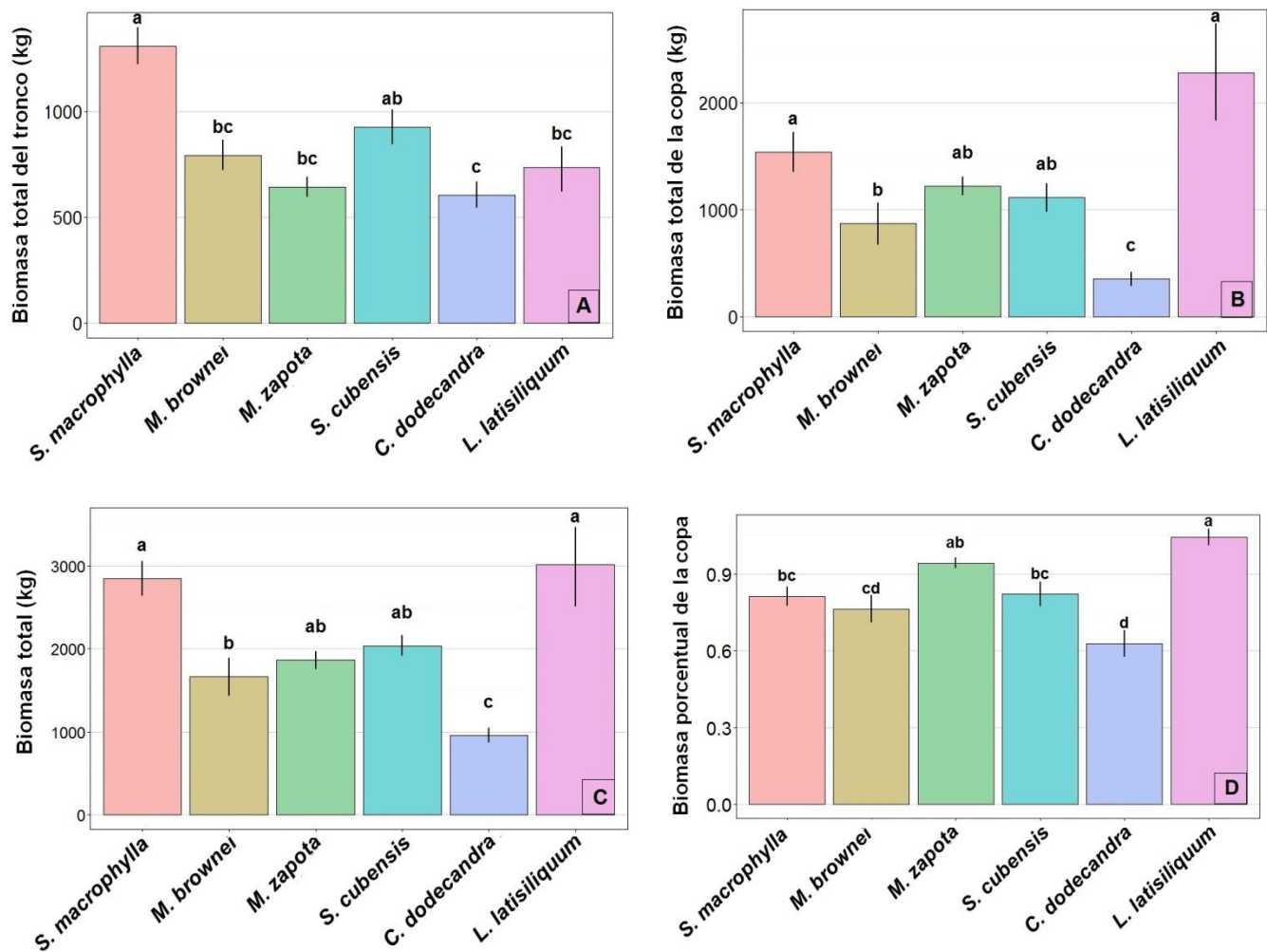


Figura 24. Gráfica de barras con desviación estándar de la biomasa en el tronco (A), biomasa total en la copa (B), biomasa total en individuos completos (C) y biomasa porcentual de la copa (respecto de todo el individuo, D) de las seis especies muestreadas. Los grupos homogéneos sugeridos por la prueba de Tukey están representados con letras.

Las seis especies de este trabajo entran dentro del rango que presenta el estudio de Ploton y colaboradores (2016) (Figura 25). Las especies en Quintana Roo presentaron un intervalo de proporción de copa entre 35.3 en *C. dodecandra* y 74.3% en *L. latisiliquum*. Con base en el histograma basado en los datos de Ploton y colaboradores (2016), *L. latisiliquum* tiende a estar en la cola derecha de la distribución, pero presenta una proporción que se ha observado en otros árboles tropicales.

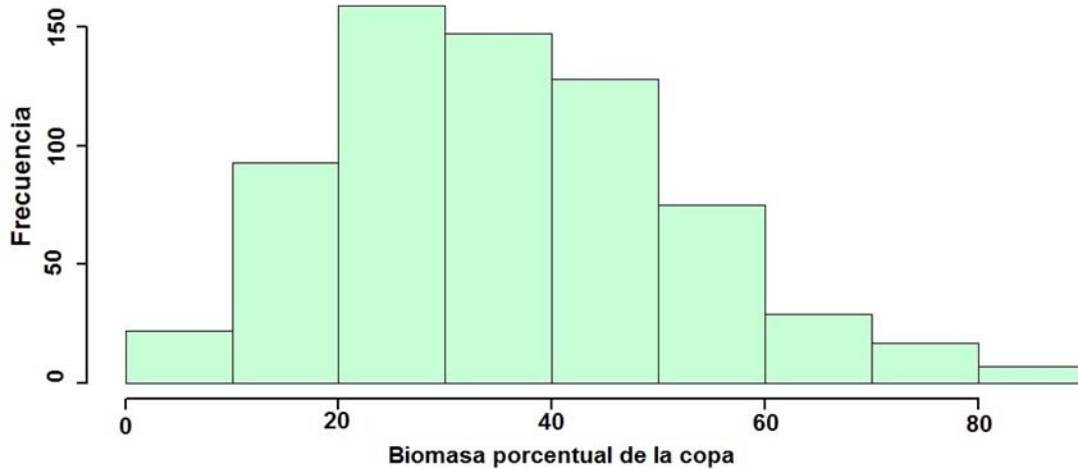


Figura 25. Histograma de la biomasa porcentual de la copa. Elaborado con los datos de Ploton *et al.*, 2016.

3. Correlación de biomasa total del individuo y longitud total.

Se observó que entre estas, la biomasa total y la longitud total de la planta (longitud del tronco más longitud de la rama primaria de la copa) hay una relación positiva ($r = 0.434$, $p < 0.001$, Figura 26). Esto indica que los árboles de mayor talla son los que tienden a tener mayor biomasa.

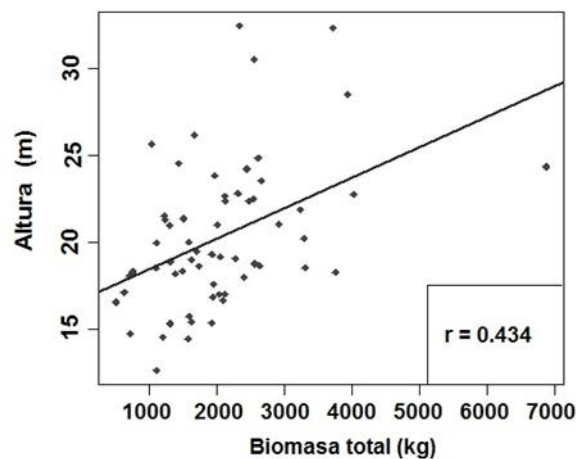


Figura 26. Correlación entre biomasa total del individuo y su altura.

4. Comparación de biomásas de las seis especies

La biomasa obtenida de las seis especies por el método aquí aplicado fue comparada con la biomasa calculada a través de la ecuación utilizada por Sánchez y colaboradores (2015). En todos los casos, las especies presentaron una mayor biomasa calculada por el método utilizado en este trabajo que la que se calculada con la otra ecuación (Tabla 6).

Tabla 6. Comparación de la biomasa calculada con el método de este estudio y calculada con la ecuación utilizada por Sánchez y colaboradores (2015).

Especie	Biomasa (kg) actual mediana	Biomasa (kg) calculada mediana	Diferencia (%)
<i>Swietenia macrophylla</i>	2642.48	1886.11	28.6
<i>Metopium brownei</i>	1384.13	1236.26	10.68
<i>Manilkara zapota</i>	1943.04	956.98	50.7
<i>Swartzia cubensis</i>	2054.45	1286.06	37.4
<i>Cordia dodecandra</i>	1074.8	769.7	28.3
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	2381.3	1338.14	43.8
Total	11480.23	7473.27	35

5. Carbono capturado en los individuos de las especies estudiadas y comparación con otro estudio

La especie que más carbono almacenó dentro del grupo estudiado fue *L. latisiliquum* y la de menor almacén fue *C. dodecandra* (Tabla 7 y Figura 26).

Tabla 7. Porcentaje de carbono en la madera y contenido medio de carbono por individuo según la especie. Los porcentajes de contenido de carbono fueron tomados de Bautista-Hernández y Torres-Pérez (2003).

Especie	Contenido de carbono en el tejido (proporción del total)	Contenido medio de carbono por individuo (tC)
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	0.4709	1.41
<i>Swietenia macrophylla</i>	0.4851	1.38
<i>Swartzia cubensis</i>	0.51	1.03
<i>Manilkara zapota</i>	0.4789	0.89
<i>Metopium brownei</i>	0.4974	0.82
<i>Cordia dodecandra</i>	0.5	0.47

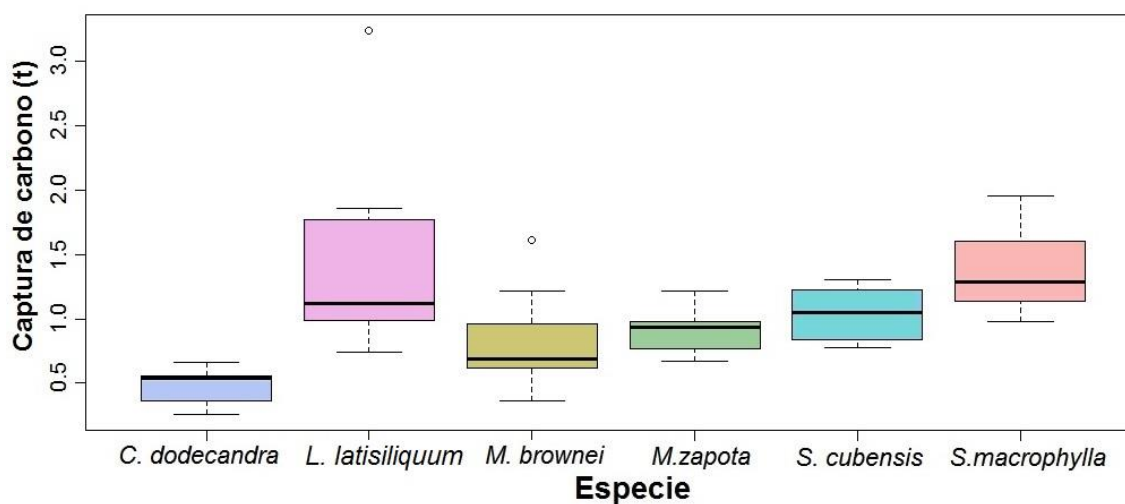


Figura 27. Carbono por individuo en cada una de las seis especies.

6. Biomasa porcentual de la corteza en el tronco, la copa y en el individuo completo.

De acuerdo con el análisis de varianza, se encontraron diferencias significativas en al menos una de las seis especies ($p < 0.001$) en cuanto a la biomasa porcentual de la corteza en el tronco, la copa y en el individuo completo (Tabla 8). La prueba de Tukey HSD permitió construir grupos homogéneos que se reportan a continuación.

Tabla 8. ANOVA para comparar la proporción de biomasa de la corteza (transformada con arcoseno) en las diferentes regiones de un árbol (tronco, copa e individuo completo).

****Indica diferencias significativas $p < 0.001$.

Variable dependiente de ANOVA	Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de p
Corteza del tronco	Especie	5	0.295	0.059	39.97	<2e-16****
	Residuos	54	0.0798	0.001		
Corteza en la copa	Especie	5	1.095	0.219	40.42	<2e-16****
	Residuos	54	0.292	0.005		
Individuo completo	Especie	5	0.96	0.192	70.64	<2e-16****
	Residuos	54	0.146	0.002		

El análisis post hoc de Tukey también se realizó en cada una de las variables de proporción, sugiriendo lo siguiente.

Para la biomasa porcentual de corteza en el tronco las especies se agruparon en básicamente dos conjuntos (Tabla 9, Figura 26). El primer conjunto incluye a los grupos *a* y *b* y a las especies *M. zapota*, *S. macrophylla* y *L. latisiliquum*. El segundo conjunto incluye al grupo *c* y *d* y a las especies restantes. En los extremos de biomasa porcentual de la corteza en el tronco se encuentran *M. zapota* con el valor medio mayor y *M. brownei* con el menor valor para este parámetro.

En cuanto a la biomasa porcentual de corteza en la copa, se generaron tres grupos homogéneos muy claros (Tabla 9, Figura 26). El grupo *a* sólo incluyó a *M. zapota*; el grupo *b* incluyó a *S. macrophylla*, *C. dodecandra* y *L. latisiliquum*, y el grupo *c*, *M. brownei* y *S. cubensis*.

Al igual que en el caso anterior, para la biomasa porcentual de corteza en un individuo se formaron tres grupos significativamente diferentes entre sí (Tabla 9, Figura 26). El grupo *a* sólo incluyó a *M. zapota*, el grupo *b* a *L. latisiliquum* y *S. macrophylla* y el grupo *c* a *C. dodecandra*, *S. cubensis* y *M. brownei*. Esta agrupación es similar, más no idéntica a la obtenida para la biomasa porcentual de corteza en la copa.

Tabla 9. Media, intervalo de confianza y grupos homogéneos resultado de la prueba de Tukey para la proporción de corteza en el tronco, copa e individuo completo.

Especie	% Corteza en tronco		% Corteza en copa		% Corteza en Individuo	
	Media (IC 95%)	Grupo	Media (IC 95%)	Grupo	Media (IC 95%)	Grupo
<i>Swietenia macrophylla</i>	14.1 (12.3 -15.9)	ab	39.3 (32.5 - 46.1)	b	27 (23.4 - 30.6)	b
<i>Metopium brownei</i>	4.6 (3.3-5.9)	d	24.1 (20.6-27.6)	c	13.7 (11.6-15.8)	c
<i>Manilkara zapota</i>	15.2 (13.7-16.6)	a	60.5 (53.3-67.7)	a	44.8 (39.6 – 49.87)	a
<i>Swartzia cubensis</i>	6.3 (5.3-7.2)	cd	21.1 (18-24.2)	c	13.7 (12.5-15.1)	c
<i>Cordia dodecandra</i>	7.1 (5.9-8.3)	c	37.4 (33.5-41.2)	b	17.8 (14.4-21.1)	c
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	11.6 (9.3-14.4)	b	36.4 (32.7-40.1)	b	29.9 (27.5-32.4)	b

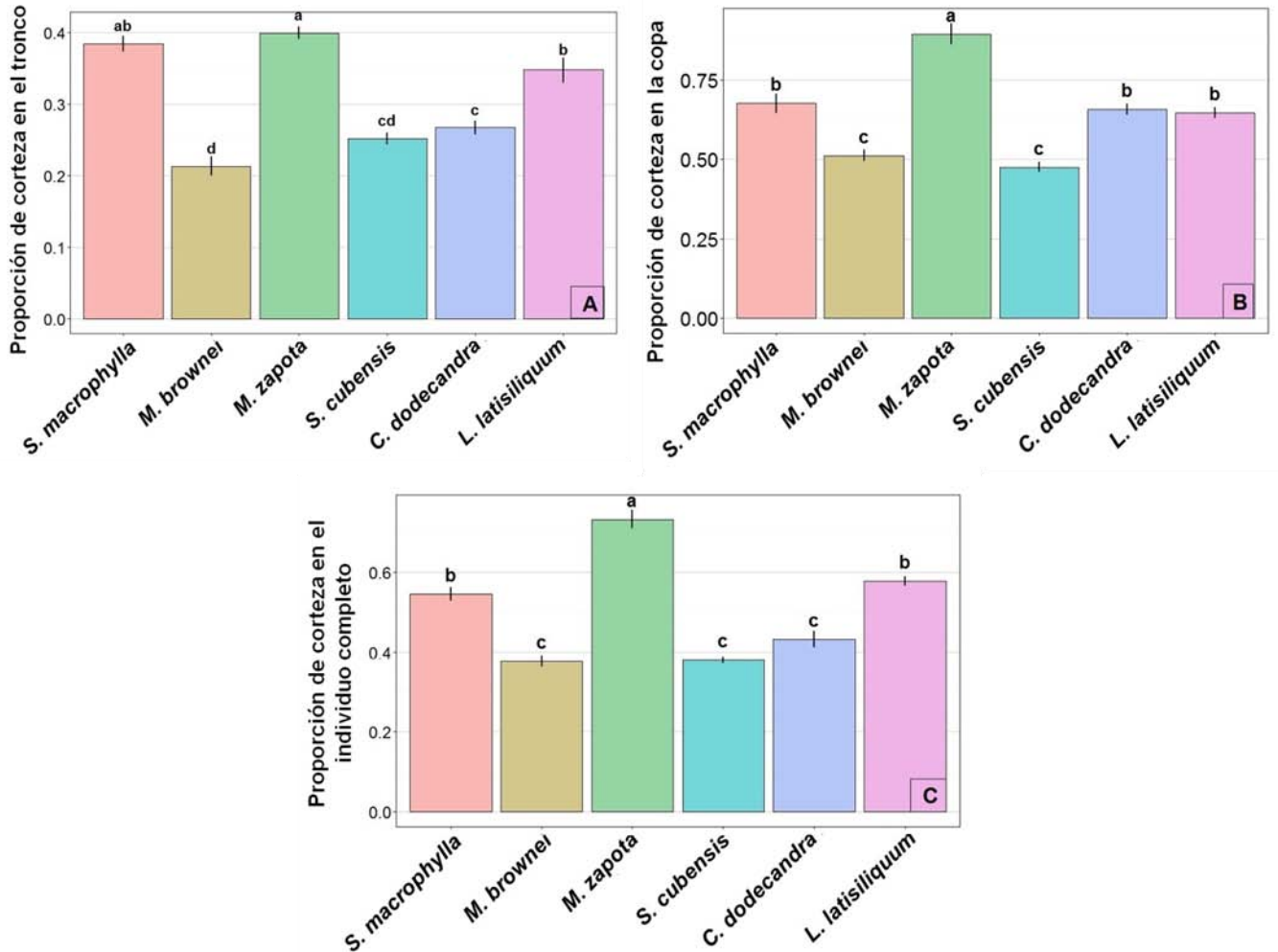


Figura 28. Gráfica de barras con desviación estándar de la biomasa porcentual de corteza en el tronco (A), biomasa porcentual de corteza en la copa (B) y biomasa porcentual de corteza en un individuo completo (C) de las seis especies muestreadas. Los grupos homogéneos sugeridos por la prueba de Tukey están representados con letras.

7. Densidad de la corteza y la madera de las seis especies.

La densidad de la corteza y la de la madera fue comparada entre especies y entre regiones de la planta (tronco, copa) a través de una ANOVA de dos vías. Los resultados muestran una diferencia entre especies y regiones de la planta. (Tabla 10).

Tabla 10. Densidad de la corteza y de la madera difirieron entre especies y regiones de la planta *** $p < 0.001$, * $p < 0.05$, ns: no significativo.

Variable dependiente de ANOVA	Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Valor de p
Densidad de la corteza	Especie	5	0.792	0.158	26.336	<2e-16***
	Región	1	0.039	0.039	6.495	0.022 *
	Especie: Región	5	0.063	0.012	2.101	0.0708
	Residuos	108	0.650	0.006		
Densidad de la madera	Especie	5	0.105	0.021	4.685	0.00065***
	Región	1	0.056	0.056	12.557	0.00058***
	Especie: Región	5	0.012	0.002	0.546	0.740 ns
	Residuos	108	0.486	0.004		

Para la densidad de la corteza entre especies y entre zonas del tallo se encontró un fuerte traslape entre los grupos homogéneos (Tabla 11, Figura 27). Los valores extremos tendieron a ser significativamente diferentes e incluyeron al tronco y la copa de *M. brownei* con los valores más bajos y al tronco y la copa de *L. latisiliquum* con los más altos.

Al igual que para la corteza, la densidad de la madera muestra gran traslape entre los grupos homogéneos (Tabla 11, Figura 27). Sin embargo, existió una fuerte tendencia a que los valores medios de la región del tronco fueran más altos de que los de la copa. En general, los valores de densidad de la madera fueron más altos que los de la corteza y presentaron menor variación entre especies.

Tabla 11. Grupos homogéneos con la prueba post-hoc de Tukey para la densidad (g/cm³) de la corteza y madera para el tronco y copa.

Especie	Región	Grupo- madera	Grupo-corteza
<i>Swietenia macrophylla</i>	tronco	cd	cd
	copa	a	cde
<i>Metopium brownei</i>	tronco	def	a
	copa	cd	ab
<i>Manilkara zapota</i>	tronco	ef	cde
	copa	cdef	cde
<i>Swartzia cubensis</i>	tronco	f	cdef
	copa	cde	def
<i>Cordia dodecandra</i>	tronco	cde	bc
	copa	ab	cd
<i>Lysiloma latisiliquum</i>	tronco	cde	ef
	copa	bc	f

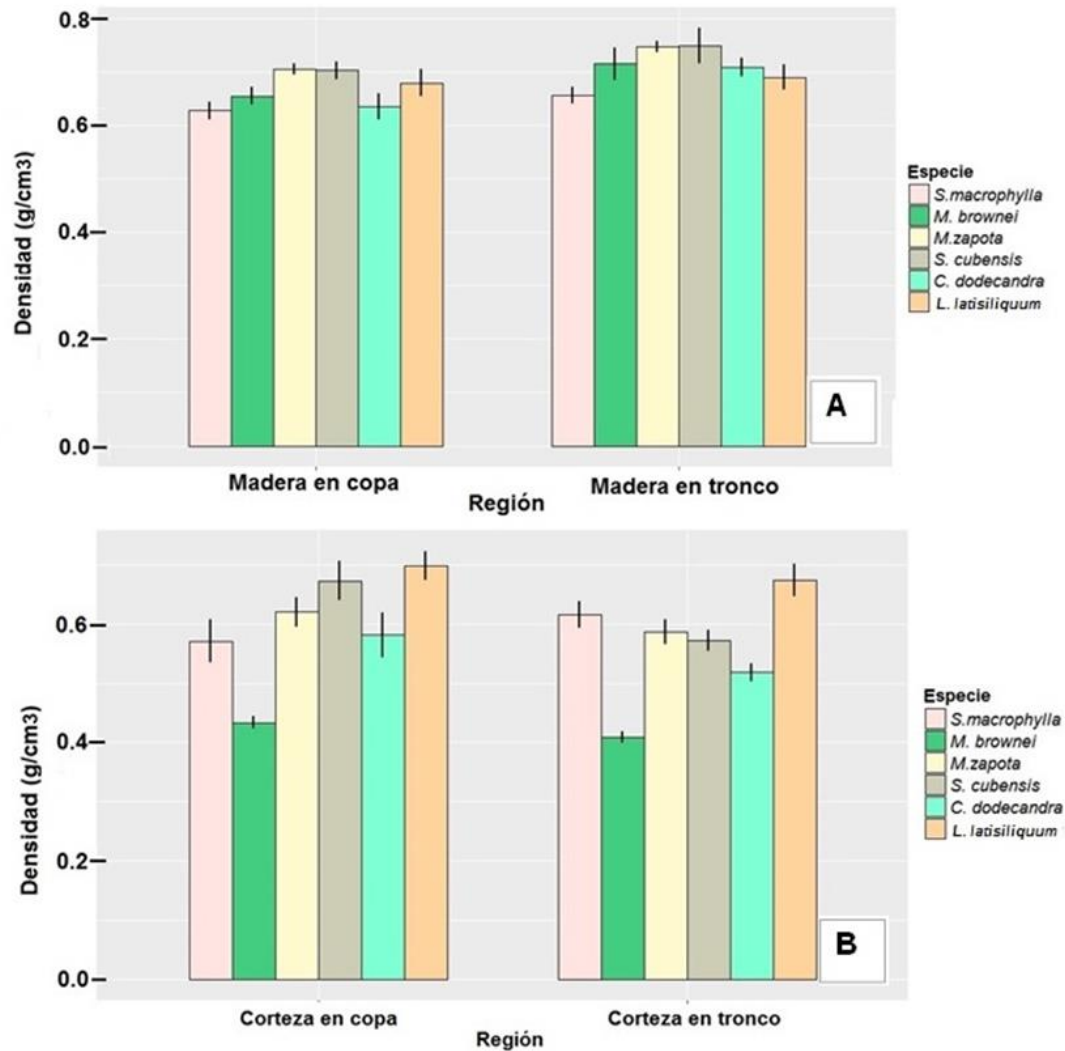


Figura 29. Gráfica de barras para una ANOVA de dos vías de la densidad de la corteza de las seis especies muestreadas. La altura de las barras representa el promedio por región del árbol y las barras de error indican la desviación estándar de la media.

8. Correlación entre la densidad y el volumen de la corteza y la madera

Se había predicho que en general un mayor volumen de corteza estaría asociado a una menor densidad. Sin embargo, en los resultados no se observó una relación muy clara. No se presentó una asociación significativa entre la densidad y el

volumen de la corteza ($r=0.216$, $p>0.01$, Figura 28 A), y lo mismo se observó para la madera ($r=0.307$, $p>0.01$, Figura 28 B).

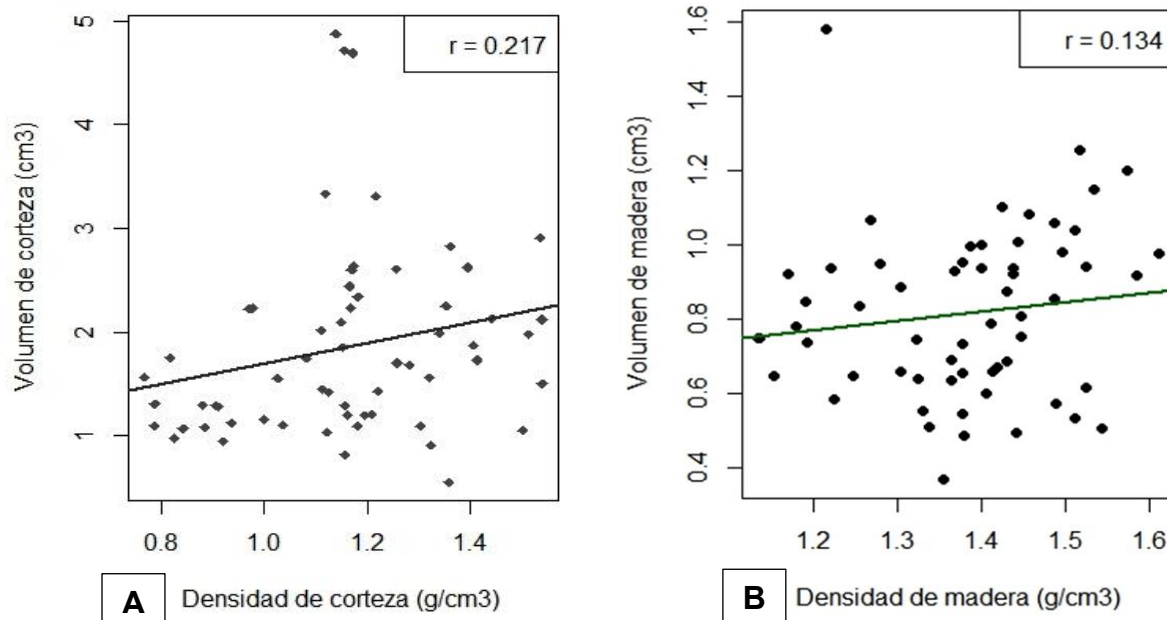


Figura 30. Correlación entre la densidad y el volumen de la corteza (A) y madera (B) en todos los individuos medidos.

9. Correlación entre densidad y tejidos de madera y corteza de las seis especies estudiadas

Se había predicho que en general una mayor densidad tanto en madera como en corteza estaría asociada a una mayor abundancia de fibras y otras células de pared gruesa. Con el análisis visual de la abundancia de fibras y otras células de pared gruesa, y aplicando la correlación de Spearman, se obtuvo una asociación congruente con esta predicción. Aunque en el caso de la madera no hay una asociación significativa ($r=0.257$, $p>0.01$, Figura 29), la correlación va en la dirección esperada (positiva). Por otro lado, hubo asociación significativa para la corteza ($r=0.883$, $p<0.01$, Figura 30) y la relación fue considerablemente fuerte.

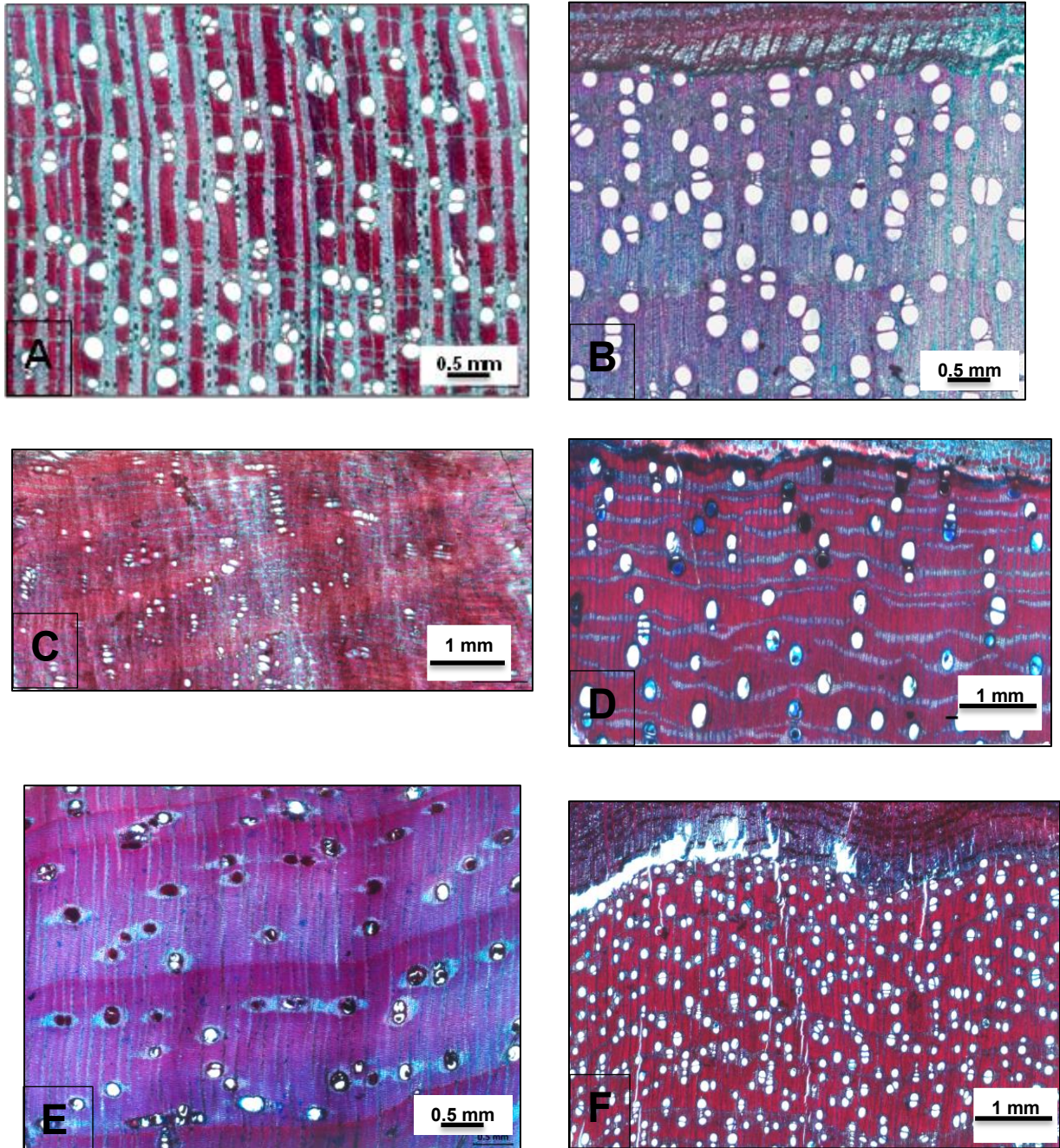


Figura 31. Cortes transversales de madera de las seis especies estudiadas ordenadas de menor a mayor contenido de fibras. (A) *C.dodecandra*, (B) *S. macrophylla*, (C) *M. zapota*, (D) *S.cubensis*, (E) *L. latisiliquum* y (F) *M.brownei*. La barra es de 0.5 mm para (A), (B) y (E); 1 mm para (C), (D) y (F).

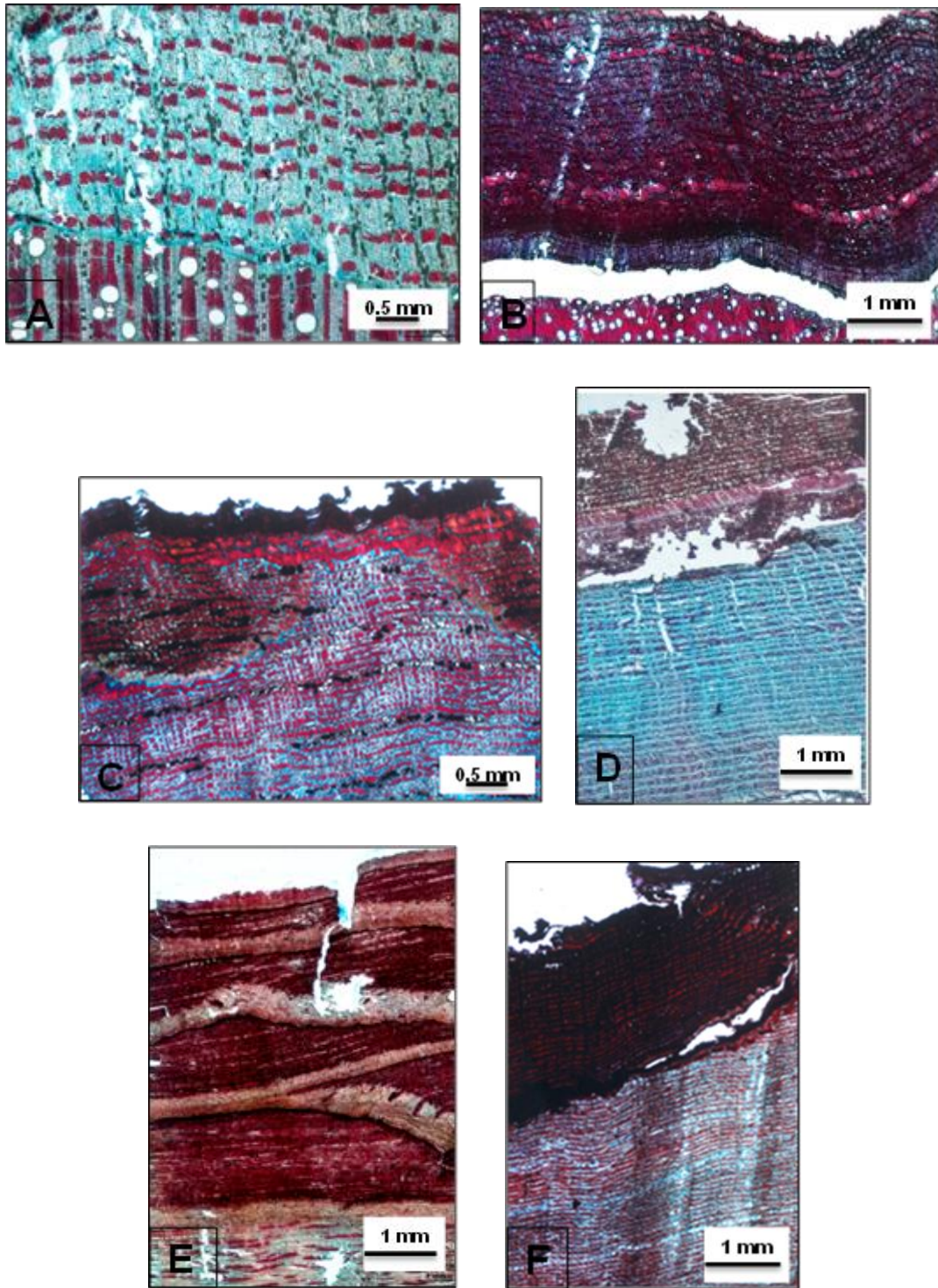


Figura 32. Cortes transversales de corteza de las seis especies estudiadas ordenadas de menor a mayor contenido de fibras. (A) *C.dodecandra*, (B) *M.brownei*, (C) *S.cubensis*, (D) *S. macrophylla*, (E) *M. zapota* y (F) *L. latisiliquum*. La barra es de 0.5 mm para (A) y (C); 1 mm para (B), (D), (E) y (F).

DISCUSIÓN

Debido a la importancia que tienen los bosques como almacenes de carbono, es fundamental tener un conocimiento preciso de los diferentes compartimentos en los que se almacena este carbono. Este trabajo muestra la muy importante contribución al almacenamiento de carbono que hace la copa de los árboles, región para la que suelen hacerse estimaciones muy gruesas e imprecisas. De igual forma, este trabajo enfatiza la relevancia de la corteza como un tejido almacenador con propiedades estructurales diferentes a las de la madera. Estos datos llenan importantes lagunas en nuestro conocimiento sobre la cantidad y la distribución del carbono almacenado en las plantas, datos cruciales para mejorar nuestros modelos de flujo de carbono en los sistemas forestales.

Biomasa aérea y almacenamiento de carbono en las especies estudiadas

Al considerar los individuos completos (tronco y copa, madera y corteza), de las seis especies de alta importancia comercial, se obtuvieron estimaciones refinadas de la biomasa aérea de cada especie y por lo tanto una mejor aproximación de su almacenamiento de carbono en el sitio de estudio.

Las especies que mostraron un mayor contenido de carbono promedio fueron *L. latisiliquum* (1.41 tC), seguido de *S. macrophylla* (1.38 tC) y *S. cubensis* (1.03 tC). Estas especies se distinguen por ser de tallas grandes, lo que se refleja en un mayor almacenamiento de carbono que las demás especies (Hernández, 2015). Esta estrecha asociación positiva fue reflejada a través de la correlación entre el largo total de cada individuo y su biomasa total. Se debe agregar que, para *C. dodecandra* son los primeros datos obtenidos sobre esta especie y en comparación con las demás, fue la que capturó menos carbono (0.47 tC) y presentó la menor altura.

Esta mayor acumulación de carbono en los árboles de mayor talla se ha discutido también en términos de la edad de las plantas. Se ha observado que los árboles de mayor edad contienen más biomasa que los árboles jóvenes y por lo tanto un

mayor almacenamiento de carbono. Esto se ha argumentado debido a la producción de madera, adjudicada principalmente al balance energético que tiene un individuo (Sillett *et al.*, 2010; Stephenson *et al.*, 2014). Sin embargo, la edad de los árboles está relacionada con su talla, por lo que los árboles dentro de una misma especie con mayor almacenamiento de carbono en este estudio son los de mayor altura y por lo tanto de mayor edad.

La biomasa calculada con el método de este estudio se comparó con aquella obtenida por la ecuación alométrica aplicada por Sánchez y colaboradores (2015) para todas las especies en el sitio. Los resultados sugieren diferencias entre estas ecuaciones, que van del 10.6 al 50.7 % en las especies estudiadas, siendo la biomasa obtenida por la ecuación alométrica siempre menor a la obtenida con el método aquí aplicado. Estas diferencias se pueden atribuir a varios factores. Uno de ellos es indudablemente el uso de una ecuación muy general para especies de arquitectura muy distinta. Una misma ecuación aplicada a plantas de tamaño y ramificación tan contrastante como *C. dodecandra* y *L. latifolium*. Otra fuente probable de diferencias es el haber considerado la biomasa aportada por la copa en uno de los métodos. La gran contribución de esta zona del árbol a la biomasa podría explicar porqué los resultados de la ecuación alométrica suelen estar por debajo de los obtenidos con el método detallado de volumen. Estas diferencias en biomasa calculada al comparar ecuaciones alométricas con otros métodos se han presentado en otros trabajos. Por ejemplo, Cairns y colaboradores (2003) presentaron diferencias en la biomasa aérea utilizando un método destructivo directo (i.e. usando el peso seco real total de los árboles) respecto de la ecuación alométrica general de Brown (1997). En donde, hay una diferencia en el diámetro a la altura del pecho entre ambos métodos y esto repercute en los resultados obtenidos.

Con estos datos obtenidos, vale la pena comparar los resultados para determinar si las mismas especies que acumulan más carbono a nivel individual son las mismas que lo hacen a nivel del paisaje. Al realizar esta comparación se observa que hay diferencias importantes. Por ejemplo, en el Ejido de Noh-bec en el estado

de Quintana Roo, las especies con mayor almacenamiento a nivel del paisaje fueron *M. zapota*, *M. brownei*, *S. macrophylla* y *S. cubensis* (Bautista-Hernández y Torres-Pérez, 2003). En el presente estudio *M. Zapota* y *M. Brownei* no fueron las especies con mayor acumulación de biomasa a nivel individual. Sin embargo, se sabe que son especies con una gran abundancia en el sitio (Arreola y Be, 2011), lo que explicaría que a nivel de paisaje realicen la mayor contribución. El hecho de que el almacenamiento de carbono por especie depende de la captura a nivel del individuo y el número de individuos de la especie en una zona debe tenerse muy en cuenta al momento de diseñar estrategias de manejo del bosque que busquen maximizar el carbono almacenado.

Almacenamiento de carbono en las copas de los árboles

La biomasa porcentual de la copa respecto de todo el individuo en cada una de las especies, denotó una gran contribución de la copa la biomasa total del árbol. Los resultados obtenidos muestran un mayor aporte dependiendo de la especie, que va de 35 a 75% de biomasa respecto a todo el individuo. De acuerdo con Ploton y colaboradores (2016), las copas pueden contribuir del 2.5 al 87.5% de la biomasa total en un árbol. En su estudio que estimó la biomasa de 673 especies árboles de bosques semicaducifolios de diferentes regiones de África y amazónicas en Perú, los autores encontraron esta amplia variación en la contribución de la copa. Las especies de este trabajo están dentro del rango de lo reportado por Ploton y colaboradores (2016).

La proporción de la biomasa representada por la copa estuvo asociada con la arquitectura del árbol. Tanto *M. zapota* como *L. latisiliquum* presentaron una baja biomasa en el tronco, pero una alta biomasa en la copa. Esta mayor biomasa en la copa se puede atribuir a una mayor ramificación o a una ramificación que comience temprano en el tronco, concordando con lo mencionado por Goodman y colaboradores (2014). El tamaño y la cantidad de las ramas pueden tener un mayor impacto en la biomasa del árbol más allá que el diámetro o la altura. Por ejemplo, puede suceder que árboles con diámetro y altura similar posean una

biomasa muy divergente si la copa es mucho más ramificada o si empieza más cerca de la base del árbol y por lo tanto contiene más biomasa.

Dentro de una misma especie, la altura parece tener efectos importantes en la biomasa que se presenta en la copa. Por ejemplo, en *S. macrophylla* los resultados obtenidos en este trabajo sobre el porcentaje de su copa indicaron un porcentaje de 52.7% en árboles con una altura media de 23.5 m. Este dato es un poco diferente a lo reportado en otros estudios para esta especie con un 62.3 % de biomasa porcentual de la copa pero en individuos con una altura de 46.7 m (Goodman et al., 2014; Ploton *et al.*, 2016). Por lo tanto, la medición de la copa de manera detalla y contrastar su biomasa con la obtenida en el tronco en cada especie muestreada, hace notar la necesidad de la inclusión de la copa por sus importantes contribuciones.

El método utilizado aquí y sus resultados en cuanto a la importancia de la copa en la acumulación de biomasa presentan diferencias fuertes con otros métodos que se han esforzado por representar a la copa en estas estimaciones. En algunos casos se toma a la copa como un modelo generalizado de cilindro o cono, y la biomasa es predicha por medio fórmulas y sin tomar en cuenta ninguna variación que pueda contribuir a la biomasa total (Chave *et al.*, 2005). Esto contrasta con los resultados de este trabajo que han resaltado la influencia tanto de la arquitectura como de la altura de la planta para las diferencias en la biomasa de la copa. Partiendo de que la forma del tronco es menos variable entre especies, se ha sugerido la separación en los modelos alométricos de la copa y el tronco para disminuir el error en la estimación de biomasa (Cannell, 1984; Plotón *et al.*, 2016). Sin embargo, estas propuestas metodológicas no realizan estimaciones por separado para la copa. Habría que decir también, que con los modelos de elipse para describir a la copa, no se refleja la alta acumulación de biomasa y complejidad arquitectónica de la copa, sobre todo en los árboles más grandes (Sillet *et al.*, 2010).

Es aquí donde vemos que al rol de las copas de los árboles no se le ha dado una justa dimensión en los modelos prácticos para el cálculo de la biomasa y en el

almacenamiento de carbono sobre todo en ecosistemas tropicales (Hardiman *et al.*, 2013). Debido a su contribución sustancial, es necesario su incorporación en los modelos alométricos para un mejor entendimiento sobre cómo es el intercambio de carbono, cómo es llevado hacia la atmósfera y la interacción el ecosistema (Picard *et al.*, 2015; Nadkarni 2016). Además, si en esta región del árbol la corteza tiende a ser más abundante, las altas contribuciones de la copa tienen una alta repercusión para la cantidad de la corteza.

Biomasa porcentual de la corteza

Muchos de los trabajos realizados sobre almacenamiento de carbono se enfocan sólo en el contenido de carbono en la madera, pero en este trabajo se tomaron muestras no sólo de la madera, sino también de la corteza tanto en el tronco como en la copa para la estimación del carbono. La corteza tuvo una mayor proporción en la copa, siendo casi el doble que en el tronco en las especies estudiadas. La mayor biomasa porcentual de la corteza la presentó *M. zapota* en ambas regiones, en el tronco con 15.2% y en la copa con 60.5%. Por su parte, *M. brownei* fue la que presentó el menor porcentaje en el tronco con 4.6% y *S. cubensis* para la copa con 21.1%.

En mi conocimiento, este es el primer estudio en presentar la proporción de corteza en un estudio interespecífico de especies tropicales, no sólo en el tronco, sino también en la parte de la copa. En estas especies se presentó un aumento de la proporción de la corteza desde el tronco hacia la copa. Como menciona Morhart y colaboradores (2016), la proporción de corteza decrece con el incremento del diámetro en donde en cierto punto esta proporción se hace más constante. Cabe destacar que en trabajos de Morhart y colaboradores (2016) y Adler y colaboradores (2005), se realizan con especies monitoreadas dentro de grandes plantaciones y los individuos muestreados son de tallas pequeñas o arbustivas. Ellos hacen énfasis en la proporción de corteza que alcanzan las ramas, en donde en algunos casos se tiene registrado que la corteza alcanza hasta el 70% en las ramas pequeñas. Además, como menciona Nygård y Elfving (1999), las especies

con más ramas bifurcantes presentan una mayor proporción de corteza que constituye una parte importante en la biomasa total de las especies.

Por lo tanto, la importancia de la proporción de la corteza repercute no sólo en la acumulación de biomasa sino también en el almacenamiento de carbono. La corteza presenta una mayor actividad metabólica, al igual que una alta concentración de algunos nutrientes elementales y tiene una notable función como tejido de almacenamiento, en comparación a la madera (Adler *et al.*, 2005). Esto implica que probablemente tenga tasas de descomposición más rápidas que la madera. Estas tasas más veloces aunadas a la gran cantidad de biomasa en la corteza seguramente hacen que la corteza sea un tejido importante dentro del ciclo del carbono en los bosques que debería tomarse por separado de la madera.

Con base en la información obtenida para las especies tropicales de este trabajo, es preciso señalar que se ha estado subestimando el papel que tiene en la corteza en la medición de biomasa total, al igual que en la acumulación de carbono. Para los modelos de cuantificación de biomasa, es necesario tomar en cuenta la madera y la corteza, desde puntos básicos como la densidad de estos tejidos, para tener una información precisa del aporte de cada uno a los ciclos biogeoquímicos de los bosques.

Densidad de madera y corteza en copa y tronco

Se presentó una ligera variación en la densidad de ambos tejidos y regiones del árbol (tronco y copa). Para el tronco, el tejido más denso fue la madera y en la copa, la corteza fue la que en muchos casos presentó una mayor densidad. La madera en el tronco mostró un ligero aumento en la densidad en comparación con la densidad en la copa. Esto es congruente con estudios como el de Swenson y Enquist (Swenson y Enquist, 2008), que reporta una mayor densidad en troncos que en ramas, aunque esta densidad fue proporcional. Cabe mencionar que los valores observados en este trabajo traslapan con lo reportado por SEMARNAT (2007) para algunas especies. En dicho reporte, *S. cubensis* y *S. macrophylla* tuvieron densidades que están dentro de las encontradas en este trabajo. Es

posible que las variaciones observadas se deban a la edad y su localización geográfica (Henry *et al.*, 2010). Además, se deben de tomar en cuenta estas pequeñas variaciones de la densidad a lo largo del árbol debido a que estas diferencias podrían generar notables errores (Yeboah *et al.*, 2013).

Por su parte, para la corteza se observaron valores ligeramente más altos en la copa que en el tronco. Por ejemplo, en el tronco se observó una variación entre especies de 0.67-0.4 g/cm³, con el mayor valor para *L. latisiliquum* y el menor para *M. brownei*. Para la copa se obtuvieron valores teniendo un rango de 0.69-0.40 g/cm³, con las mismas especies para estos valores extremos. Esto puede deberse a la mayor proporción de corteza externa en el tronco, que en muchos casos está constituida de tejidos esponjosos (felemas, Roth, 1981) que podrían disminuir la densidad de la corteza en esa porción de los árboles (Rosell *et al.* 2016).

Comparando las tendencias entre estos dos tejidos, el más denso en la parte del tronco para todas las especies, fue la madera, ya que generalmente tiene un aumento de la parte superior a la inferior del tronco. Esto es congruente con Dibdiakova y Vadla (2012), quienes reportan que en algunas coníferas de Noruega, la densidad de la madera es más alta en las ramas bajas y disminuye hacia las ramas altas.

Muchas veces no se toman en cuenta estas variaciones, sobre todo en la madera que es el tejido que se mide comúnmente y puede haber una sobreestimación o subestimación de biomasa en el tronco, según sea el caso.

Hay que mencionar además, que se hubiera esperado que en tanto la madera como la corteza hubiera una fuerte correlación con la densidad de estas mismas. Pero con lo obtenido en este trabajo, se mostró que su correlación fue positiva pero débil.

La densidad es una variable crucial para hacer las estimaciones de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea vegetal. Para mejorar nuestras estimaciones no sólo es necesaria la densidad de la madera, también es necesario tomar en cuenta la de la corteza en los cálculos (Henry *et al.*, 2010).

Esto es particularmente relevante dada la gran biomasa que parece presentar este tejido en las plantas. La densidad puede variar entre ambientes, pero en general es un atributo relativamente constante al interior de una especie. Esta constancia seguramente está asociada a sus características anatómicas que por lo tanto tienen un papel importante en el almacenamiento de carbono (Williams y León, 2010; Ordoñez *et al.*, 2015).

Relación entre la densidad de los tejidos y su estructura anatómica

Como se esperaba, la relación entre el contenido de fibras y células de pared gruesa con la densidad, tanto en la madera como en la corteza, fue positiva. Por lo tanto, al tener un mayor número de fibras y otras células de pared gruesa con abundante lignina se observó una mayor densidad. Se han realizado estudios que examinan la relación entre anatomía y densidad para la madera. Por ejemplo, Zieminska y colaboradores (2013) encontraron que la densidad de la madera estaba fuertemente asociada a la variación en la fracción de lúmenes de los vasos y las paredes de las fibras. Estos resultados son congruentes con lo encontrado en este trabajo. Desafortunadamente, no se cuenta con estudios de naturaleza similar para la corteza. Sin embargo, es de esperar que estas mismas características anatómicas como la pared de las fibras sea un factor crucial para la variación en la densidad de la corteza.

Se debe agregar que, la anatomía es una parte importante en el entendimiento del almacenamiento de carbono en los diferentes tejidos. Es notable resaltar que no se tienen datos detallados de la anatomía de la corteza y menos de estas especies. Conviene entonces, poner énfasis en los datos presentados para la corteza, ya que al tomarla en cuenta, se mejorarán las predicciones de la biomasa y consecuentemente en la estimación del almacenamiento de carbono.

Adecuado manejo forestal e integración a REDD+

Con los datos de este estudio se han llenado lagunas muy importantes en nuestro conocimiento sobre la cantidad y la distribución del carbono almacenado en las

plantas. Esto tiene fuertes implicaciones para esfuerzos a nivel nacional e internacional como el programa REDD+, con el que se busca canalizar beneficios económicos por el servicio ambiental de captura de carbono.

Se debe de indagar más a cerca de un mejor aprovechamiento forestal combinado con la captación de ingresos por el almacenamiento de carbono. Una de las opciones como lo proponen en el Ejido de Noh-bec (Bautista-Hernández y Torres-Pérez, 2003), es hacer una combinación entre los ingresos obtenidos por el aprovechamiento forestal maderable con lo generado por los servicios ambientales, en específico con la captación de carbono. Con esta combinación generada, podría ser una manera diferente en que la comunidad y el ecosistema tratado podrían salir ganando.

Además de nuevas proposiciones para este manejo sustentable de este ecosistema, es necesario e importante el empoderamiento de las personas locales en este tipo de programas de servicios ambientales. Haciendo a estas comunidad parte de la solución, en donde el gobierno y programas como REDD+ reconozcan los derechos sobre la tierra y su cultura (Frechette *et al.*, 2007). Al mismo tiempo, de brindar protección a esta zona, que lleva consigo una derrama socioeconómica y ambiental. Además de entender con precisión los flujos de carbono en los bosques es crucial para este y otros esfuerzos de mitigación del cambio climático, para el manejo sustentable y justo de la selva y para el mantenimiento de la biodiversidad

CONCLUSIONES

- La aplicación de un método detallado para la estimación de la biomasa de los individuos completos, de las regiones de un árbol (tronco y copa), y de los dos tejidos principales en los tallos (madera y corteza), permitió tener un mejor acercamiento a la captura de carbono de las especies.
- La estimación del carbono en la copa es una contribución importante de este estudio, pues mostró que es muy probable que su papel en el almacenamiento de carbono en los bosques se ha subestimado en muchos de los modelos.
- Con los resultados obtenidos en las seis especies, se evidenció la fundamental contribución de la copa a la biomasa aérea de los bosques.
- Este trabajo resaltó la participación de la corteza en la biomasa aérea y por consiguiente en el almacenamiento de carbono. Esta contribución se dio principalmente a través de la copa, región en donde la corteza es significativamente más abundante que la madera.
- En cuanto a la densidad, se observaron ligeras variaciones entre la madera y la corteza. En el caso del tronco, la madera presentó mayor densidad y para la copa, lo hizo la corteza. Estas tendencias en densidad se asociaron a la estructura anatómica de los tejidos, en particular con la cantidad de fibras y otras células de pared gruesa.
- Contar con datos precisos del carbono en la copa y en la corteza llevará a un mejor entendimiento de los flujos de carbono en estos ecosistemas para posteriores aplicaciones en programas como REDD+

RECOMENDACIONES

- ✓ Realizar un escalamiento de las seis especies estudiadas a toda el área forestal del Ejido, al igual que en la parte de la reserva.
- ✓ Trabajar con más especies importantes de esta zona, ya que así nos podrías dar una mejor idea del almacenamiento de carbono en la península de Yucatán.
- ✓ En las siguientes estimaciones de biomasa y captura de carbono, tomar en cuenta la copa y corteza de los árboles.
- ✓ Estudiar más afondo la relación que hay entre las fibras y la captura de carbono tanto en madera como en corteza.
- ✓ Comparar estas nuevas estimaciones de carbono a las anteriores para poder aplicarlas en la parte de pago por servicios ambientales del programa REDD+.

BIBLIOGRAFÍA

- Aalde, H.; González, P.; Gytarsky, M.; Krug, T.; Kurz, W. A. y Oleg, S. 2006. Tierras Forestales. 1(93):15-16
- Acosta, M., F. Carrillo, y R. Gómez. 2011. Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(4):529-543
- Adler, A., T. Verwijst y P. Aronsson. 2005. Estimation and relevance of bark proportion in a willow stand. *Biomass and Bioenergy*. 29:102-113.
- Arreola, J. y E. Be. 2011 Plan de manejo, Ejido Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo 2012-2023. CONAFOR-PROCYMAF-II, PNUD-COMPACT, Maya natura tropical a. C. Tropica rural latinoamericana A. C., U'YO'OL CHE A. C
- Aschan G, Pfanz H. 2003. Non-foliar photosynthesis - a strategy of additional carbon acquisition. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 198: 81–97
- Baker, R., J. Carrillo, y A. Silverman. 2014. El desarrollo de un Sistema Nacional de Salvaguardas para REDD+ en México. Centro Mexicano de derecho ambiental. BIC. CIEL.
- Bautista-Hernández J. y Torres-Pérez, J.A. 2003. Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del Ejido Noh Bec, Quintana Roo, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 9(1):69-75.
- Bonan, G.B. 2008. Forest and climate change; forcing, feedback and the climate benefits of forest. *Science* 320, 1444-1449.
- Bray, D.B. and P. Klepeis. 2005. Deforestation, forest transitions, and institutions for sustainability in south-eastern Mexico, 1900-2000. *Environment and History* 11: 195-223.
- Bray, D.B. y A. Velázquez. 2009. From Displacement-based Conservation to Place-based Conservation. *Conservation & Society*. 7:11-4
- Brown, S.; A.J.R Gillespie y E. Lugo. 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35:881-902.

- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer. In FAO. Forestry papers 134, 134, 55 pp. Rome, Italy. FAO at http://www.fao.org/icatalog/search/dett.asp?aries_id=7736.
- Brown, S. 2010. Bosques y cambio climático y la función de los bosques como sumideros de carbono. Disponible en: http://www.chacaltaya.edu.bo/index.php?option=com_content&view=article&id=86:bosques-y-cambio-climatico-y-lafuncion-de-los-bosques-como-sumideros-decarbono&catid=49:articulos-cc&Itemid=67
- Cairns, M., I. Olmsted, J. Granados y J. Argaez. 2003. Composition and aboveground tree biomass of dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula. *Forest Ecology and Management*. 186(1-3): 125-132.
- Cannell, M. G. R. 1984. Woody biomass of forest stands, *Forest Ecol. Manag.*, 8, 299–312.
- Cartus, O.; J. Kellndorfer; W. Walker; C. Franco; J. Bishop; L. Santos y J.M. Fuentes. 2014. A national, detailed map of forest aboveground carbón stock in Mexico. *Rmote Sens.* 6: 5559-5588.
- Castellanos, J., J.M. Maass and J. Kummerow. 1991. Root biomass of a dry deciduous tropical forest in Mexico. *Plant and Soil*. 131:225-228 tesis michoacán
- CDIAC. Carbon Dioxide Information Analysis Center 2014. Oak Ridge National Laboratory, U.S Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. <http://cdiac.ornl.gov/mission.html>
- Chapela y Mendoza, G. 2014. Las comunidades forestales Mexicanas frente a REDD+. Examen para la garantía de los derechos de las comunidades: Salvaguardas, distribución de beneficios de emisiones, monitoreo, verificación y registro. REDD+, Red Mexicana de Esfuerzos contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (RIOD-Méx), Bank Information Center (BIC), Red Indígena de Turismo de México (RITA), Red Mexicana de Organizaciones Campesinas Forestales (Red MOCAF), Plataforma Finlandesa de Organizaciones No Gubernamentales (KEPA) Y Alianza Mesoamericana de Pueblos y Bosques (AMPB).

- Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA, Chambers JQ, Eamus D, Fölster H, Fromard F, Higuchi N, Kira T, Lescure JP, Nelson BW, Ogawa H, Puig H, Riéra B, Yamakura T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145(1): 87-99.
- Chávez-Pascual, E.Y.; Rodríguez-Ortíz, G., Carrillo-Rodríguez, J.C., Enrique-del Valle, J.R., Chávez-Servia, J.L y Campos-Ángeles, G. 2013. Factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus chiapensis* (Mart.) Andresen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 6:1273-1284.
- Clark, B.D y Clark, D.A. 2000. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management*. 137:185-198.
- Colter, B. E.; R.E. Will. G.A. Barron, R.O. Teskey y B. Shiver. 2003. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliotti* stands of different planting densities. *Forest Science*. 49(2):224-234.
- CONAFOR, MVR, Sistema de Medición, Reporte y Verificación. 2015 <http://www.mrv.mx/index.php/es/mrv-m.html>
- Coomes, O.T., F. Grimard, C. Potvin and P. Sima. 2008. The fate of the tropical forest: Carbon or cattle? *Ecological Economics* 65: 207-212.
- Cornwell WK, Cornelissen JHC, Allison SD, Bauhus J, Eggleton P, Preston CM, Scarff F, Weedon JT, Wirth C, Zanne AE. 2009. Plant traits and wood fates across the globe: rotted, burned, or consumed? *Global Change Biology* 15(10): 2431-2449.
- Curtis, H. y Schenek, A. 2008. *Biología*. Ed. Médica Panamericana. 1160 p.
- Dávalos, R., M. Rodríguez y E. Pinillos-Cueto, 2008. Almacenamiento de carbono. Pp. 223-233. In: Manson R.H., Hernández-Ortiz V., Gallina S. y Mehlreter K. (eds). *Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz: biodiversidad, manejo y conservación*. Instituto de Ecología A.C. (INECOL) e Instituto Nacional de Ecología (INESEMARNAT), México.
- Dibdiakova, J. y Vadla, K. 2012. Basic density and moisture content of coniferous branches and wood in Northern Norway. *EPJ Web of Conferences* 33:1-6.
- Duarte C.M.; S. Alonso; G. Benito; J. Dach; C. Montes; M. Pardo; A. Ríos; R. Simó y F. Valladares. 2006. *Cambio global. Impacto de la actividad humana*. Colección divulgación. Consejo Superior de Investigaciones Científicas Madrid. 163 p.

- ENAREDD+, Estrategia Nacional para REDD+, 2014. Disponible en:
http://www.ccmss.org.mx/descargas/ENAREDD_abril_2014.pdf
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2004. Actualización de la Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales a 2005. Términos y Definiciones (versión definitiva). Roma 26 p.
<http://www.fao.org/forestry/9690-0d07adfee9364a4127238bf3ffc7d6ab2.pdf>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2005. Sala de Prensa, Incentivos contra la deforestación para combatir el cambio climático. Disponible en:
<http://www.fao.org/Newsroom/es/news/2005/1000176/index.html>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Las emisiones de carbono de los bosques disminuyen un 25% entre 2001 y 2015.
<http://www.fao.org/news/story/es/item/281292/icode/>
- Frechette, A.; Reutar, K, Saini y Walker, W. 2007. Toward a global baseline of carbon storage in collective lands and updated analysis of indigenous peoples and local communities' contributions to climate change mitigation. The Rights and resources Initiative (RRI) www.rightsandresources.org
- Gay, C. y J. Martínez. 1995. Mitigation of emissions of greenhouse gases in Mexico. *Interciencia*, 20(6):336-342
- Goodman, R.C.; O.L Phillips y T.R. Baker. 2014. The importance of Crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecological Society of America*. 24(4), 680-698.
- Hall, F.G.; Bergen, K.; Blair, J.B.; Dubayah, R.; Houghton, R.; Hurtt, G.; Kelndorfer, G.; Lefsky, M.; Ranson, J.; Saatchi, S.; et al. 2011. Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements. *Remote Sens. Environ.* 115; 2753-2775.
- Hardiman B.S.; C.M. Gough, A. Halperin, K.L. Hofmeister, L.E. Nave, G. Bohrer y P.S. Curtis. 2013. Maintaining high rates of carbon storage in old forest: A mechanism linking canopy structure to forest function. *Forest Ecology and Management*. 298; 111-119.

- Henry, M.; A. Besnard, W.A. Asante, J. Eshun, S. Adu-Bredu, R.Valenti, M.Bernoux y L. Saint-André. 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*. 260, 1375-1388.
- Hernández, A. 2015. Estimación del contenido y captura de carbono en la segunda sección del Bosque de Chapultepec, Distrito Federal. Tesis de licenciatura. UNAM. Facultad de Ciencias. Ciudad Universitaria, D.F.
- INAFED, Instituto para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. 2010. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Estado de Quintana Roo. SEGOB. Secretaría de Gobernación. Citado en: <http://inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM23quintanaroo/index.html>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo. Clave geoestadística 23002. 1-9 pp.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación: escala 1:250 000. Serie IV. Aguascalientes, México.
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación: escala 1:250 000. Serie IV. Aguascalientes, México.
- IPCC, Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2000. Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura. Informe especial del Grupo de trabajo III. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. 29 p.
- IPCC, Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2007. Fourth Assessment Report: Climate Change. Mitigación del Cambio Climático. Tendencias de las emisiones de gases de efecto invernadero. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/es/spmsb.html
- IPCC, Panel Intergubernamental de Cambio Climático. 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland,

[report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full.pdf)

- Klooster, D. y O. Masera. 2000 “Community Forest Management in Mexico: Carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development” *Global Environmental Change* 10(4):259-272.
- Lamton, S.H. y Savidge, R.A. 2003. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy* 25:381-388
- Lasky, J.R., Uriarte, M., Boukili, V., Erickson, D., Kress, J. y Chazdon, R. 2014. The relationship between tree biodiversity and biomass dynamics changes with tropical forest succession. *Ecology letters*.
- Litton CM, Raich JW, Ryan MG. 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13(10): 2089-2109.
- Mander, U., A. Kull, V. Tamm, V. Kuusements y R. Karjus. 1998. Impact of climatic fluctuations and land use change on runoff and nutrient losses in rural landscapes. *Landscape and Urban Planning* 41(3- 4):229-238.
- Masera, O.R., T. Hernández, A. Ordóñez y A. Guzmán. 1995. Land use change and forestry. *In: Preliminary National Inventory of Greenhouse Gases: México. UNEP PROJECT GF/4102- 92-01(PP/3011). Instituto Nacional de Ecología. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. U.S. Country Studies Program. México, D.F*
- Masera, O.R. 1996. *Desforestación y Degradación Forestal en México. Documento de Trabajo No. 19. GIRA, A.C. Pátzcuaro, México.*
- Merino, L. 1997. *Revaloración de la selva y manejo forestal comunitario. La experiencia de la Organización de Ejidos Forestales de la Zona Maya de Quintana Roo. Tesis doctoral. Instituto de Investigaciones Antropológicas, UNAM. México.*
- Morhart, C., J. Sheppard, J. Schuler y H. Spiecker. 2016. Above-ground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.)- a case study. *Forest Ecosystems*. 15 p.
- Nadkarni, N. 2016. *Conserving the canopy. TED talks.*

- Nijnik, M. 2009. Chapter 8: Carbon Capture and storage in forest. From Hester, R.E and R. M. Harrison. Carbon Capture: Sequestration and storage. RSC Publishing. 206-207p
- Nygård, R. y Elfving, B. 2000. Stem basic density and bark proportion of 45 woody species in Young savanna coppice forests in Burkina Faso. *Ann.For.Sci.* 57:143-153
- Ordóñez, J. y Masera, O. 2001. La captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1):3-12
- Ordoñez, J. y Rivera, R. 2015. Contenido y captura potencial de carbono en la biomasa forestal de San Pedro Jacuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales.* 6(32):7-16.
- Ordoñez, J.; Galicia, A., Venegas, N., Hernández, T., Ordoñez, M. y Dávalos-Sotelo, R. 2015. Densidad de las maderas mexicanas por tipo de vegetación con base en la clasificación de J. Rzedowski: compilación. *Madera bosques.* 21:77-126.
- Pan, Y.; Birdsey, R., Phillip, O. y Jackson, R. 2013. The structure, distribution and biomass of the world's forests. *The Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* http://www.rainfor.org/upload/publication-store/2013/Pan/AnnRevEcolEvoSyst_Pan_et_al_2013_World_Forests.pdf
- Pardos, J.A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Madrid. 253 p.
- Pennington, T. y Sarukhán, J. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para identificación de las principales especies. Ediciones Científicas Universitarias. Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo de Cultura Económica. México, D.F. 523 p.
- Picard N., Saint-André L., Henry M. 2012. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Montpellier, 215 pp.

- Ploton P, N. Barbier, ST Momo, M. Réjou-Méchain, F. Boyemba, G. Chuyong, G. Dauby, V. Droissart, A. Fayolle, RC. Goodman, M. Henry, NG. Kamdem, J. Katemoto, D. Kenfack, M. Libalah, A. Nogomanda, V. Rossi, B. Sonké, N. Texier, D. Thomas, D. Zebaze, P. Couteron, U. Berger, R. Pélissier. 2016. Closing a gap in tropical forest biomass estimation: taking crown mass variation into account in pantropical allometries. *Biogeosciences* 13:1571-1585. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-13-1571-2016>
- Quinn, G. y M, Keough. 2002. *Experimental design and data analysis for biologist*. Cambridge University Press. New York. 557 p.
- Raven, P.H, R.F.Evert y S.E. Eichhorn. 2005. *Biología de Plantas*. 3 ed. Freeman & Co. Publishers.686 p.
- REDD+, Reducción de Emisiones de carbono por Deforestación y Degradación; CONAFOR, Comisión Nacional Forestal. 2014. Iniciativa de fortalecimiento de capacidades para el monitoreo comunitario en México. 1-16 pp. En: <http://www.monitoreoforestal.gob.mx/acervo/files/original/5d6c3079f0f5b0275a777cb079b8f2cc.pdf>
- Reyes, F. 2013. Genera nuevas capacidades y empleo la colaboración entre CONAFOR y el ejido Felipe Carrillo Puerto. *Observador forestal- Boletín de difusión del Proyecto Fortalecimiento del Proceso de Preparación para REDD+ en México y Fomento a la Cooperación Sur-Sur* 4(1).
- Rodríguez. V. 2013. Tesis: Estimación dasométrica de carbono almacenado en un bosque de *Abies religiosa* (H.B.K) Schl. et Cham. Del paraje el cedral del Parque Nacional "El Chico", Hidalgo. Dirigido por: M en C. Vásquez G.C. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
- Rojas, F. y Villers, L. 2008. Estimación de la biomasa forestal del Parque Nacional Malinche: Tlaxcala-Puebla. *Revista Ciencia Forestal en México*. 33(104):59-86.
- Rojo, M.G.E; J.J. Mata y M.A Velásquez. 2003. Las masas forestales como sumideros de CO₂ ante un cambio climático global. *Revista Chapingo. Serie Ciencias forestales y del Ambiente*. Enero-Julio. 9 (001):57-57
- Román Miranda, M.; A. Gallegos Rodríguez, A. Mora Santacruz, M. Sánchez Durán, G. González Cueva y E. Hernández Álvarez. 2014. Productos maderables y no

maderables de tres especies del Sureste de México. Rev. Mex. CIEN. For. 5(24):40-55.

Romero, C. 2014. Bark structure and functional ecology en Cunningham, Campbell, B.M y Luckert, M.K (eds) Bark use, management and commerce in Africa, Advances in Economic Botany 17, New York Botanical Garden Press, pp 5-25.

Rosell, J.; Gleason, S., Méndez-Alonzo, R., Chang, Y y Westboy M. 2013. Bark functional ecology: evidence for tradeoffs, functional coordination, and environment producing bark diversity. *New Phytologist* 1:12

Rosell, Julieta A., Gleason, Sean, Méndez-Alonzo, Rodrigo, Chang, Yvonne, & Westoby, Mark. 2014. Bark functional ecology: evidence for tradeoffs, functional coordination, and environment producing bark diversity. *New Phytologist*, 2012, 486-497. doi: 10.1111/nph.12541

Rosell, J.; Castorena, M., Laws, C. y Westboy, M. 2015. Bark ecology of twigs vs. main stems: functional traits across eighty five species of angiosperms. *Physiological Ecology- Original Research*.

Roth, I. 1981. Structural patterns of tropical barks. *Encyclopedia of Plant Anatomy*. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart. Germany. 609 p.

RStudio Team (2014). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.

Salamanca, I. 2007. Estimation of Forest biomass and its error. A case in Kalimantan, Indonesia. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation. Enschede, The Netherlands. 10p. Tesis para Maestria http://www.itc.nl/library/papers_2007/msc/gem/samalca.pdf

Sánchez, G., J. Arreola, D. López, V. Maldonado, M. Olguín, C. Wayson, O. Carrillo y R. Puc. 2015. Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono en Quintana Roo. CONAFOR, SEMARNAT.

Savidge RA. 2000. Biochemistry of seasonal cambial growth and wood formation-an overview of the challenges. In: Savidge RA, Barnett JR, Napier R, editors. *Cell and molecular biology of wood formation*. Bios Scientific Publishers Limited.

Schulze, E.D.; C. Wirth y M.Heimann. 2000 Climate change: Managing Forest After Kyoto. *Science*. 289:2058-2059.

- SEMARNAT, 2007. Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. Tomo II. Gobierno federal. 132 pp.
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2012. Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. 2013. Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010. SEMARNAT, INECC, GEF y PNUD.
- Sillett, S. C., Van Pelt, R., Koch, G. W., Ambrose, A. R., Carroll, A. L., Antoine, M. E., and Mifsud, B. M. 2010. Increasing wood production through old age in tall trees, *Forest Ecol. Manag.*, 259, 976–994.
- Silva-Arredondo, F.M y Návar-Chávez, J. 2010. Expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Rev. Mex. Cien. For.* 1(1):55-62.
- Silver, L.; W.R. Ostertag y A.E. Lugo. 2000. The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agriculture and pasture. *Restoration Ecology* 8:394-407.
- Sloan, S., Jenkins, C.N., Joppa, L.N., Gaveau, D.L.A, Laurance, W.F. 2014. Remaining natural vegetation in the global biodiversity hotspot. *Biol. Conserv.* 117, 12-24.
- Somogyi, Z.; Ciencia, E.; Muukkonen, P.; Lehtonen, A. and Weiss, P. 2006. Indirect methods of large scale forest biomass estimation. *European J. Forest Res.* 3:11-13.
- Stephenson, N. L., Das, A. J., Condit, R., Russo, S. E., Baker, P. J., Beckman, N. G., Coomes, D. A., Lines, E. R., Morris, W. K., Rüger, N., Álvarez, E., Blundo, C., Bunyavejchewin, S., Chuyong, G., Davies, S. J., Duque, Á., Ewango, C. N., Flores, O., Franklin, J. F., Grau, H. R., Hao, Z., Harmon, M. E., Hubbell, S. P., Kenfack, D., Lin, Y., Makana, J.-R., Malizia, A., Malizia, L. R., Pabst, R. J., Pongpattananurak, N., Su, S.-H., Sun, I.-F., Tan, S., Thomas, D., van Mantgem, P. J., Wang, X., Wiser, S. K., and Zavala, M. A.: Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size, *Nature*, 507, 90–93, doi:10.1038/nature12914, 2014.

- Swenson, N. y Enquist B. 2008. The relationship between stem and branch wood specific gravity and the ability of each measure to predict leaf area. *American Journal of Botany*. 95(4):516-519.
- Thomas, S.C. y Malczewski, G. 2007. Wood carbon of tree species in Eastern China: Interspecific variability and the importance of the volatile fraction. *Journal of Environmental Management* 85:659-662.
- Torres. G. 2011. Captura de Carbono en un Bosque de Coníferas del Estado de México mediante percepción remota. Asesor: M. en C. Martín Enrique Romero Sánchez. UNAM Facultad de Estudios Superiores Iztacala.
- Torres. J. 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del Sector Forestal en América Latina Documento de Trabajo. Informe Nacional México. SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México y FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2004.
- U'yoolché A.C. 2007. Estudio para identificar y establecer un área de conservación de vida silvestre. Ejido de Felipe Carrillo Puerto. 1-57p.
- UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. 2014. Disponible en: <http://unfccc.int/260.php> [Acceso: Noviembre, 2016].
- Urquiza-Haas, T.; P. M. Dolman y C. A. Peres. 2007. Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: effects of forest disturbance. *Forest Ecology and Management* 247:80-90.
- Vashum. K.T y Jayakumar, S. 2012. Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forest-a review. *Ecosystem and Ecography*. 2(4): 2-7.
- Vázquez-Yanes, C., A. I. Batis Muñoz, M. I. Alcocer Silva, M.Gual Díaz y C. Sánchez Dirzo. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte del proyecto J084. CONABIO- Instituto de Ecología, UNAM.
<http://www.biodiversidad.gob.mx/especies/reforestacion/espReforestacion.html>
- Wehenkel C., Cruz-Cobos F., Carrillo A. y Lujan-Soto J. E. 2012. Estimating bark volumes for 16 native tree species on the Sierra Madre Occidental, Mexico, *Scandinavian Journal of Forest Research*, Taylor and Francis Group. 8 p.

- Williams, J. y León, H. 2010. Anatomía y densidad o peso específico de la madera. *Revista Forestal Venezolana*. 54(1): 67-76
- Woodbury, P.B, Smith, J.E, Heath, L.S., 2007 Carbon sequestration in the US forest sector from 1990 to 2010. *For.Ecol.Manage.* 241, 14-27.
- Xu, B., Yang, Y.H., Li, P., Shen, H.H., Fang, J.Y. 2014. Global patterns of ecosystem carbon flux in forest: a biometric data-based synthesis. *Global Biogeochem. Cycles* 28, 962-973.
- Xu., B.; Y. Pan, A. Plante, A. Johnson, J. Cole y R. Birdsey. 2016. Decadal change of forest biomass carbón stocks and tree demography in the Delawere River Basin. *Forest Ecology and Management*. Elsevier. 374, 1-10.
- Yeboah, D.; Burton, A. y Storer, A. 2013. Variation in wood density and a carbon content of tropical plantation tree species from Ghana. *New Forest* 45:35-52.
- Zen, Zeiss Microscopy. 2014. <https://www.zeiss.com/microscopy/int/about-us.html>
- Zieminska, K., D. W. Butler, S. M. Gleason, I. J. Wright, and M. Westoby. 2013. Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. *AoB PLANTS* 5:plt046
- Zobel BJ, Sprague JR. 1988. Juvenile wood in forest trees. Berlin Heidelberg: Springer