



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.

Posgrado en Energía Renovable

ESTIMACIÓN DEL CARBONO RETENIDO EN LA  
BIOMASA AÉREA, EN UNA SELVA TROPICAL DE  
YUCATÁN, MÉXICO.

Tesis que presenta

MARCO AURELIO RAMÍREZ GUARDADO

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

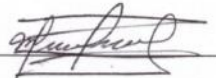
Mérida, Yucatán, México, septiembre de 2015



### **DECLARACIÓN DE PROPIEDAD**

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el periodo que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativo o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollados tecnológicos que deriven o pudieran derivar de los correspondientes a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de ese trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

**Firma:**



**Nombre:** Marco Aurelio Ramírez Guardado





## RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis titulado Estimación del carbono retenido en la biomasa aérea, en una selva tropical de Yucatán, México fue realizado en los laboratorios de las Unidades de Energía Renovable y Recursos Naturales del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección de los Doctores. Donny Ponce Marbán y Juan Manuel Dupuy Rada, dentro de la Opción Energía Renovable, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias en Energía Renovable de este Centro.

Atentamente

---

Dr. Manuel Martínez Estevez

Director de Docencia

Centro de Investigación Científica de Yucatán, AC.



## **AGRADECIMIENTO**

- Primeramente a Dios por darme salud, fuerza y voluntad para poder lograr esta nueva etapa de mi vida.
- Al gobierno de México por la beca número 302576 otorgada a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el convenio con el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Al Centro de Investigación Científica de Yucatán, la Unidad de Energía Renovable por permitir formar parte de sus estudiantes y a la Unidad de Recursos Naturales por permitirme vincular mi trabajo con ellos.
- Al Dr. Donny Víctor Ponce Marbán (director de tesis) por su apoyo, orientación y consejos brindados para poder cumplir y finalizar esta maestría.
- Al Dr. Juan Manuel Dupuy Rada (codirector de tesis) por todo su apoyo, consejos, orientaciones y mucha paciencia para que pudiera finalizar mis estudios.
- Al Dr. Roger Orellana Lanza y el Dr. Gregorio Ángeles Pérez como parte de mi Comité tutorial por sus contribuciones, orientaciones, observaciones y revisión de mi tesis.
- A los miembros de mi comité revisor, el Dr. Javier O. Mijangos Cortés y el Dr. Juan José Jiménez Osornio por la revisión del documento de tesis.
- A mis profesores de la Unidad de Energía Renovable por compartir sus enseñanzas y conocimientos, especialmente a la Dra. Liliana Alzate Gaviria por todo el apoyo desinteresado desde el momento de aplicación al posgrado.
- Al Dr. José Luis Hernández Stefanoni por su apoyo y orientación en el proceso de análisis de datos estadísticos.

- A mis compañeros de maestría y doctorado: Patricia Aguilar, Emy Uchín, Rubí Chablé, Samantha Paredes, Edgar Olguín, Giovanni Escobar, Silvano Chalé, Andrés Mílquez, por su compañerismo, paciencia y compartir sus experiencias.
- Al Laboratorio de Ecología de la Unidad de Recursos Naturales, especialmente a Juan Pablo Caamal Sosa y Manuela Tamayo por su apoyo, colaboración y orientación para poder llevar a cabo todo el trabajo de campo.
- A los amigos de GSA Mérida Licenciada Yadira Herrera, Ing. Ricardo Buenfil, Gregorio Canul y Fredy y amigos de GSA Honduras.
- A Kaxil-Kiuc A. C. y el personal de la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuc de Yucatán, México.





## **DEDICATORIA**

### **A mi padre celestial**

Por darme el preciado regalo de la vida, conocer otras culturas y costumbres, así como salud, y sobre todo sabiduría para poder culminar estos estudios.

### **A mis padres**

Juan José Ramírez Pinto y Ángela Guardado Díaz, por ser las personas más maravillosas, por sus consejos, por darme una excelente educación, por todo su apoyo y por todo su amor.

### **Muy especial**

Orleni Márquez, a mi hija Crisney Sohé Ramírez Márquez y mi hijo Christopher David Ramírez Márquez por ser personas muy especiales en mi vida, que me han llenado de mucho amor, comprensión y sobre todo mucho ánimo para poder seguir a delante.

### **A mis hermanos, hermanas y amigos**

Por sus consejos, orientaciones y por todo su apoyo.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
INTRODUCCIÓN .....	1
JUSTIFICACIÓN .....	4
CAPÍTULO I .....	5
1. ANTECEDENTES GENERALES .....	5
1.1 Cambio climático y Emisión de Gases de Efecto Invernadero .....	5
1.2 Efectos del Cambio Climático. ....	6
1.3 Contaminación atmosférica de gases de efecto invernadero. ....	7
1.4 El Protocolo de Kyoto.....	9
1.5 Importancia de los bosques para el cambio climático. ....	11
1.6 REDD+ como incentivo económico para la mitigación del cambio climático.....	13
1.7 Captura de carbono. ....	13
1.8 La Importancia del estudio de la biomasa en los bosques. ....	14
1.9 La biomasa como materia prima para obtención de energía renovable.....	15
1.10 Cuantificación de biomasa y carbono en el bosque. ....	17
1.11 Uso de ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa y carbono. ....	18
1.12 Bosques tropicales y su importancia en el ciclo global del carbono y la mitigación del cambio climático.....	19
1.13 Bosques tropicales secos sus características e importancia. ....	21
1.14 Factores que afectan la biomasa y el carbono en los bosques tropicales.....	22
1.14.1 Sucesión secundaria.....	23
1.14.2 Topografía. ....	26

OBJETIVOS .....	29
Objetivo General .....	29
Objetivos Específicos .....	29
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	30
HIPÓTESIS .....	31
CAPITULO II.....	32
2.    MATERIALES Y METODOS .....	32
2.1    Localización del área de estudio.....	32
2.2    Metodología utilizada para el muestreo en campo. ....	34
2.3    Estimación de la biomasa en el área de estudio.....	36
2.4    Estimación de la biomasa y el CO <sub>2</sub> capturado en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.....	37
2.5    Análisis estadísticos.....	38
CAPITULO III .....	39
3.    RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	39
3.1    Biomasa aérea total, viva y muerta, carbono almacenado y CO <sub>2</sub> absorbido en la Reserva Kaxil-Kiuic. ....	39
3.2    Comportamiento de la biomasa aérea en función de la edad de sucesión y la condición topográfica. ....	41
3.3    Comportamiento de la biomasa aérea en relación con la edad de sucesión.....	41
3.4    Comportamiento de la biomasa aérea en relación con las diferentes categorías de edad.....	44
3.5    Comportamiento de la biomasa aérea en relación con la pendiente. ....	48
3.6    Comportamiento de la biomasa aérea en relación con las diferentes categorías de pendientes. ....	51
3.7    Especies que más contribuyeron a la biomasa aérea en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic. ....	54

CONCLUSIONES.....	59
PERSPECTIVAS .....	61
BIBLIOGRAFÍA .....	62
ANEXOS .....	76
ANEXO A.....	76
ANEXO B.....	84
ANEXO C.....	86

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Concentración media global de CO <sub>2</sub> hasta julio 2015.....	7
Figura 2.	Clasificación de la biomasa.....	16
Figura 3.	Secuencia de la edad de sucesión en bosques tropicales.....	23
Figura 4.	Mapa de la ubicación geográfica de la Reserva Estatal Biocultural Kaxil-Kiuic, al sur de Yucatán, con los 32 conglomerados contemplados en la presente estudio. ....	32
Figura 5.	Metodología utilizada para el levantamiento de datos en la reserva Kaxil-Kiuic, Yucatán, México (basado en el diseño del INFyS modificado para la red MEX-SMIC).....	34
Figura 6.	Conglomerados dentro de un área de 9 km <sup>2</sup> ubicados alrededor de la torre de flujo de covarianza de torbellinos (elaborado por el Dr. Juan Manuel Dupuy 2013).....	35
Figura 7.	Biomasa aérea total ton ha <sup>-1</sup> (DN 2 cm) en parcelas de 400 m <sup>2</sup> de diferentes edades de abandono en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic. ....	42
Figura 8.	Biomasa aérea viva ton ha <sup>-1</sup> (DN 2cm) en parcelas de 400 m <sup>2</sup> de diferentes edades de abandono en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic. ....	42
Figura 9.	Biomasa aérea muerta ton ha <sup>-1</sup> (DN 2 cm) en parcelas de 400 m <sup>2</sup> de diferentes edades de abandono en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic. ....	43
Figura 10.	Biomasa aérea total por categoría de edad en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de edad ( =0.05, Tukey): 1: 3-5; 2: 10-17; 3: 18-25; 4>25 años. ....	45
Figura 11.	Biomasa viva por categoría de edad en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio ± error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de edad ( =0.05, Tukey). 1: 3-5; 2: 10-17; 3: 18-25; 4>25 años. ....	45

- Figura 12. Biomasa aérea muerta por categoría de edad en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de edad ( $\alpha=0.05$ , Tukey): 1: 3-5; 2: 10-17; 3: 18-25; 4>25 años. .... 46
- Figura 13. Biomasa aérea total ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) para individuos con DN  $\geq 2$  cm en parcelas de 400  $\text{m}^2$  en función de la pendiente en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic..... 49
- Figura 14. Biomasa aérea viva ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) para individuos con DN  $\geq 2$  cm en parcelas de 400  $\text{m}^2$  en función de la pendiente en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic..... 49
- Figura 15. Biomasa aérea muerta ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) para individuos con DN  $\geq 2.5$  cm en parcelas de 400  $\text{m}^2$  en función de la pendiente en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic. .... 50
- Figura 16. Biomasa aérea total por categoría de condición topográfica en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de condición topográfica ( $\alpha=0.05$ , Tukey). 1: sitios planos con pendientes menores al 10%; 2: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% con exposición norte; 3: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición sur..... 51
- Figura 17. Biomasa aérea viva por categoría de pendiente en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de condición topográfica ( $\alpha=0.05$ , Tukey). 1: sitios planos con pendientes menores al 10%; 2: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición norte; 3: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición sur. .... 52
- Figura 18. Biomasa aérea muerta por categoría de pendiente en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de condición topográfica ( $\alpha=0.05$ , Tukey). 1: sitios planos con pendientes menores al 10%; 2: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición norte; 3: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición sur. .... 52

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa en la Reserva Kaxil-Kiuic.....	36
Tabla 2.	Valores estimados de biomasa aérea total, viva y muerta, carbono almacenado y su equivalente en CO <sub>2</sub> en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.....	39
Tabla 3.	Especies que contribuyen con el 80% de la biomasa total estimada en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.....	54
Tabla 4.	Especies que aportaron mayor biomasa (80%) en la categoría de edad 3 (CE3)... .....	55
Tabla 5.	Especies que aportaron mayor biomasa (80%) en la categoría de edad 4 (CE4)... .....	56
Tabla 6.	Especies que aportaron el 80% de la biomasa total en la categoría de pendiente 2 (CP2). ....	57



## RESUMEN

Los bosques son importantes por su contribución a la mitigación del cambio climático y producción de biomasa como fuentes renovables para la obtención de energía. La problemática ambiental que prevalece en los bosques se debe, en parte, al poco conocimiento de la magnitud de los bienes y servicios ambientales que proveen. La estimación de la biomasa forestal permite cuantificar el carbono almacenado y el CO<sub>2</sub> absorbido por la misma. En el presente trabajo se estimó la biomasa y carbono aéreo almacenados en rodales de diferentes edades de sucesión (3-100 años) y condiciones de topografía y exposición en 32 conglomerados tipo Inventario Nacional Forestal y de Suelos en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic en Yucatán México. Dicha estimación se efectuó usando ecuaciones alométricas en cuatro parcelas circulares de 400 m<sup>2</sup> por conglomerado. El carbono aéreo almacenado fue de 57.605±2.71 ton ha<sup>-1</sup>. La edad de sucesión y la condición topográfica en la reserva se relacionaron con la biomasa aérea, explicando 61% de su variación. La edad se relacionó positivamente con la biomasa aérea y explicó 60% de su variación; el mayor aporte de biomasa aérea se encontró en las categorías de edad 3 (18-25 años) y 4 (25 años) con 120.16±5.79 y 147.05±6.17 ton ha<sup>-1</sup>. La topografía también se relacionó con la biomasa aérea explicando 23% de su variación; la mayor biomasa aérea correspondió a pendientes intermedias, particularmente en cerros con pendientes 10% y con exposición norte con 156.78±8.96 ton ha<sup>-1</sup>. Entre las especies que más contribuyeron a la biomasa aérea están: *Bursera simaruba*, *Lysiloma latisiliquum*, *Caesalpinia gaumeri* y *Piscidia piscipula*. La estimación de la biomasa es importante ya que permite establecer los presupuestos locales y globales de carbono, indispensables para implementar estrategias de mitigación forestal ante el cambio climático. La edad de sucesión, la pendiente y la exposición afectan la biomasa y el carbono aéreo, siendo la edad el componente que mayor variación explica. Las selvas mayores a 18 años son las que almacenan mayor biomasa y carbono aéreo en la reserva, particularmente aquellas ubicadas en pendientes mayores o igual al 10% y con exposición norte.

## ABSTRACT

Forests are important for their contribution to mitigate climate change and for biomass production as a renewable source of energy. The environmental problems prevailing in forest are due in part to the scant knowledge about the magnitude of the goods and environmental services that they provide. Estimating forest biomass allows quantifying the amount of carbon stored and CO<sub>2</sub> absorbed. In this study the amount of above-ground carbon stored in forest stands of different ages of succession (3-100 years) and conditions of topography and aspect was estimated in 32 clusters of plots based on the National Forest and Soils Inventory scheme in Kaxil-Kiuic Biocultural Reserve in Yucatan, Mexico. These estimate were performed using allometric equations in four circular plots of 400 m<sup>2</sup> per cluster. Above-ground carbon stock was 57.605±2.71 t ha<sup>-1</sup>. Successional age and slope conditions in the reserve were positively related to above-ground biomass, explaining 61% of its variation. Stand age was positively associated with above-ground biomass and explained 60% of its variation; the largest above-ground biomass was found in age categories 3 (18-25 years) and 4 ( 25 years) with 120.16±5.79 and 147.05±6.17 ton ha<sup>-1</sup>. Topography was also related to above-ground biomass and explained 23% of its variation; the largest above-ground biomass was found in intermediate slopes, particularly on hills with slopes 10% facing north with 156.78±8.96 t ha<sup>-1</sup>. Some of the species that contributed most to above-ground biomass were: *Bursera simaruba*, *Lysiloma latisiliquum*, *Caesalpinia gaumeri*, and *Piscidia piscipula*. Estimating above-ground biomass is very important to establish the regional and global carbon budget, and to implement mitigation strategies for climate change. Age of succession, slope and aspect affect above-ground biomass and carbon, and stand age is the component that most variation explains. Most of above-ground biomass and carbon in the reserve is stored in forest stands older than 18 years, particularly those located on slopes greater or equal to 10% and with north aspect.

## INTRODUCCIÓN

Los bosques desempeñan un papel sumamente importante en la mitigación del cambio climático a nivel global. Sin embargo, existen obstáculos para la implementación de estrategias forestales de mitigación tales como: dificultades en la medición de la cantidad total y la tasa de captura de carbono de los bosques, desplazamientos potenciales de emisiones (fugas), coordinación ineficiente entre niveles de gobierno e instituciones, riesgo de corrupción y actividades ilegales; que en conjunto dificultan la cuantificación del potencial de captura de carbono en los bosques [1].

Los biomas forestales son las principales reservas de carbono terrestre y los componentes principales de la productividad primaria global. Por otro lado, la deforestación y degradación de estos bosques libera a la atmósfera gran parte del carbono almacenado en ellos [2]. El balance del carbono de los bosques está determinado por una serie de procesos y un pequeño cambio en la magnitud de estos, tendría un gran impacto en el ciclo global de este elemento [3]. El carbono es asimilado por la biosfera a través de la fotosíntesis y emitido a la atmósfera a través de la respiración de autótrofos (plantas) y heterótrofos (animales, microbios) y por la descomposición. La magnitud de estos procesos varía de un bioma a otro, pero algunos de los flujos más grandes ocurren en bosques o selvas tropicales. Las selvas tropicales se encuentran entre los más importantes ecosistemas terrestres y son las menos monitoreadas en términos de su contribución al ciclo del carbono. En los últimos años, su influencia en las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono y el vapor de agua se ha convertido en tema de muchas investigaciones [4].

Otro tema de gran importancia es el uso de la biomasa como fuente renovable para la obtención de energía. En el contexto actual, los países industrializados han comenzado a considerar la biomasa como una materia prima idónea para la producción de bioenergía y productos químicos, dado su carácter renovable y su amplia distribución. Una de las características principales de la utilización de la biomasa, al contrario de lo que ocurre con los productos derivados de las materias primas fósiles (no renovables), es que presenta un balance de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) casi neutro desde el punto de vista ambiental [5], por

lo que la cantidad de carbono que ha sido almacenado en la biomasa prácticamente es la misma que se libera cuando es sometida al proceso de combustión.

Otro aspecto importante de la biomasa forestal es que permite estimar la magnitud de los flujos de gases de efecto invernadero (GEI), como; el CO<sub>2</sub>, que son liberados de la biosfera terrestre a la atmósfera, cuando ocurren cambios de cobertura y uso de la tierra. Tales estimaciones basadas en mediciones directas son muy limitadas para los bosques tropicales secos [6]. La estimación de la biomasa forestal también ayuda a comprender los cambios en la estructura de los bosques resultantes de la sucesión, así como a diferenciar los tipos de bosque. En los últimos años ha existido un interés especial por estimar la biomasa (masa seca/unidad de área) forestal y su aporte al ciclo del carbono (balance de carbono entre la atmósfera y la biosfera terrestre), en relación con el cambio climático global [7].

Debido a la gran cantidad de carbono almacenado en los bosques y la diversidad de sus comunidades biológicas, el desarrollo de iniciativas de protección de los mismos a través de estrategias de reducción de las emisiones derivadas de la deforestación y la degradación forestal y de conservación, manejo sostenible y mejoramiento de las reservas de carbono de los bosques (REDD+) en los países en desarrollo, es considerado como una de las formas más eficientes y rentables para mitigar el cambio climático [8].

Recientemente se ha puesto mucho interés en la cuantificación de los GEI, principalmente el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>); desarrollando metodologías para la medición y estimación de los diferentes reservorios: el suelo, la vegetación y la materia orgánica. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), ha propuesto metodologías para la cuantificación de los reservorios de carbono [9], siendo estas ampliamente utilizadas para el desarrollo de proyectos forestales relacionados con esta temática. Los principales componentes o reservorios son:

- Biomasa viva: de tallos, follaje y raíces de árboles adultos y juveniles, hierbas y arbustos.
- Biomasa muerta: árboles y arbustos muertos en pie, mantillo y material leñoso caído en diferentes estados de descomposición.
- Suelo mineral [10].

Estas propuestas metodológicas aportan las bases que permiten cuantificar el papel de los ecosistemas forestales en la mitigación del cambio climático a través de la fijación y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, de ahí la importancia de la presente investigación. Los objetivos de este estudio fueron tres: estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea en la selva tropical mediana subcaducifolia de la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic; analizar cómo varía la biomasa aérea en función de la edad de sucesión o abandono, la condición topográfica y la exposición; y determinar cuáles son las especies que mayor aporte tienen a la biomasa aérea en cada condición.

## JUSTIFICACIÓN

Los ecosistemas boscosos desempeñan un papel muy importante dado que proporcionan al ser humano bienes y servicios ambientales, tales como la captura y almacenamiento de GEI principalmente el CO<sub>2</sub>, emitidos a la atmósfera por actividades antropogénicas; la protección y conservación de suelo; la obtención de productos forestales maderables y no maderables; la regulación del clima y de la calidad de agua; el mantenimiento de la fertilidad del suelo y la biodiversidad en diferentes paisajes; la provisión de alimentos; forraje; plantas medicinales; actividades recreativas; entre otros.

La problemática ambiental que prevalece en los bosques se debe, en parte, al escaso conocimiento de la diversidad, bienes y servicios ambientales que proveen y los impactos que las actividades humanas tienen sobre ambos. En el presente estudio se estimó la biomasa aérea en una selva, incluyendo aspectos relevantes tales como medir la cantidad de carbono aéreo total almacenado en diferentes componentes y evaluar la influencia de la edad de abandono, la posición topográfica y la exposición, todo lo cual brinda información relevante para realizar los presupuestos globales de carbono, diseñar políticas de mitigación, así como desarrollar herramientas de gestión para la captura de carbono. Otro aspecto importante del estudio de la biomasa en una selva radica en conocer qué tipo de biomasa puede ser utilizada como materia prima potencial para la obtención de energía renovable (madera muerta para la cogeneración y para el uso en biorrefinería) así como cuáles podrían ser algunas alternativas de manejo en áreas naturales y en otros ecosistemas forestales. Esto puede ayudar a reducir los riesgos de incendios forestales y mejorar la salud de los ecosistemas forestales.

Otro aspecto importante que permite el estudio de la biomasa se refiere a los ingresos que pueden obtener los propietarios y usuarios a través de la venta de créditos de carbono, brindando medios alternativos de ingresos que también motivan a la conservación y concientización de la población acerca de su importancia y su cuantificación, lo que contribuiría al manejo sustentable de los bosques con la participación activa de la población.

# CAPÍTULO I

## 1. ANTECEDENTES GENERALES.

### 1.1 Cambio climático y Emisión de Gases de Efecto Invernadero.

El Cambio Climático se define como: un cambio en el estado del clima que puede ser identificado mediante el uso de pruebas estadísticas, debido a los cambios en la media y la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado, típicamente décadas o más [11].

Desde finales del siglo XIX los expertos en cambio climático han observado un aumento gradual en la temperatura promedio de la superficie del planeta. Según reportes del IPCC durante los últimos 100 años (1906-2005), la temperatura media de la superficie de la tierra aumentó en 0.74 °C, siendo este calentamiento mayor en la tierra que en los océanos [12].

Este calentamiento ha reducido las áreas cubiertas de nieve en los glaciares y está aumentando el nivel del mar. Esto se debe en gran parte a un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y otros gases presentes en la atmósfera que son responsables del efecto invernadero, el cual controla la radiación infrarroja que es retenida en la atmósfera y reflejada a la tierra. Como producto de esta retención de calor, la temperatura promedio sobre la superficie de la tierra alcanza 16 °C, la que es propicia para el desarrollo de la vida en el planeta [13].

Los GEI se han estado generando desde hace millones de años a través de fuentes naturales como el vulcanismo, la respiración en los ecosistemas, el ciclo del carbono en la vegetación y los procesos fisicoquímicos en los océanos. Desde la revolución industrial, en la segunda mitad del siglo XVIII, las actividades antropogénicas, entre ellas el uso de combustibles fósiles para la industria, la generación de electricidad y el transporte, la producción de cemento para la construcción, el cambio de uso de suelo, entre otros, han contribuido en gran medida al incremento de los GEI. Estas actividades han venido alterando el ciclo natural del carbono en los sistemas biológicos a gran escala, con graves consecuencias para el clima y los ecosistemas del planeta, la salud y la seguridad humana, lo cual ha despertado el interés internacional. Sin embargo es sólo en tiempos recientes que la humanidad ha sido consciente de que las afectaciones locales a los ecosistemas pueden, de manera conjunta,

tener un gran impacto a nivel global y que éstas serán mayores en el largo plazo e involucran interacciones complejas entre procesos naturales, sociales, económicos y políticos a escala mundial [14].

## **1.2 Efectos del Cambio Climático.**

Hace más de 100 años, el ser humano comenzó hacer uso de cantidades considerables de carbón y petróleo para sus hogares, fábricas y medios de transporte, sobre todo por la industria del acero. Las emisiones de GEI se incrementaron notablemente, por la combustión de estos materiales fósiles liberando dióxido de carbono y otros GEI, alterando el ciclo del carbono de forma tal que por estas emisiones el planeta se calienta con mayor rapidez que en siglos pasados. Los siguientes son algunos de los efectos que se están generando a causa de las actividades antropogénicas que coadyuvan al cambio climático:

- El nivel del mar se está elevando. Durante el siglo XX, subió unos 15 cm (6 pulgadas) debido al hielo que se ha derretido de los glaciares y la expansión térmica de agua marina al calentarse [15].
- El hielo del Mar Ártico se está derritiendo. El espesor en verano del hielo del mar es aproximadamente la mitad de lo que era en 1950. El hielo que se derrite puede generar cambios en la circulación del océano. Además está acelerando el calentamiento en el Ártico [15]. Los glaciares y el permafrost se están derritiendo. Durante los últimos 100 años, el tamaño de los glaciares de las montañas en todas las áreas del mundo se ha reducido y junto con ello la cantidad de permafrost en el Ártico. La capa de hielo de Groenlandia se está derritiendo más rápido también. Esto trae como consecuencia la liberación masiva de metano, atrapado originalmente por debajo del permafrost en forma de hidrato de metano [16].
- Las temperaturas de la superficie del mar están aumentando. Las aguas más calientes en océanos poco profundos han contribuido a la muerte de aproximadamente una cuarta parte de los arrecifes de coral del mundo en las últimas décadas. Muchos de los pólipos del coral arrecifal mueren luego de verse debilitados por el blanqueamiento, un proceso vinculado con aguas más calientes. Otro problema existente en los océanos es la acidificación, causada por el incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> (siendo este ecosistema el principal

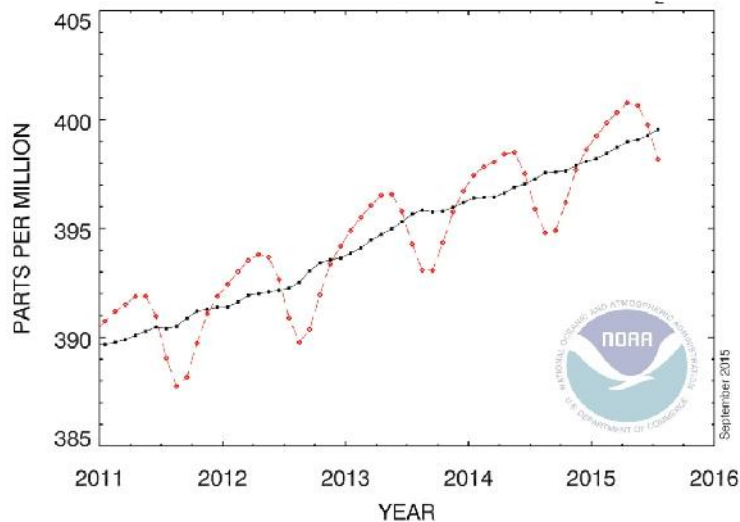


sumidero natural de carbono, debido a que el CO<sub>2</sub> atmosférico al entrar en contacto con el agua de los océanos, produce una reacción química en la que se forma ácido carbónico. Aproximadamente el 50% de CO<sub>2</sub> es asimilado a través del plancton, corales, peces, aragonita y dolomita en fondos profundos etc.) [16].

- Las temperaturas más altas han conducido a que se exacerben algunos componentes de la circulación atmosférica, con lo cual hay aumento en eventos de precipitación más intensos en algunas áreas, causando inundaciones en muchas regiones.
- Las sequías extremas también están aumentando. Temperaturas más altas pueden causar una tasa más elevada de evaporación y más sequías en algunas áreas del mundo [16].

### 1.3 Contaminación atmosférica de gases de efecto invernadero.

Las concentraciones atmosféricas del CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera han ido en aumento en los últimos siglos; se estima que hacia 1750, la concentración atmosférica de este gas era de 227 partes por millón (ppm) [17], y que con el inicio de la era industrial esta concentración aumentó aproximadamente a 393 ppm [18]. La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) reporta concentraciones de 396 ppm para el 2014 y de 398 ppm para el 2015 (Figura 1).



**Figura 1.** Concentración media global de CO<sub>2</sub> hasta julio 2015 [19].

El aumento de esta concentración total se debe en gran medida a las emisiones de CO<sub>2</sub> que provienen de la quema de combustibles fósiles así como a la producción de cemento, alcanzando valores de 9.7±0.5 Gt en el 2012, un 2.2% más alto que las emisiones en 2011. Para el 2012 las emisiones humanas se distribuyeron de la siguiente manera: carbón (43%), petróleo (33%), gas (18%), cemento (5.3%) y la quema de gas (0.6%). Estas cuatro primeras categorías se incrementaron en 2.8, 1.2, 2.5 y 2.5% respectivamente con respecto al año anterior [20].

Otra fuente que aporta en gran medida a estas emisiones son los residuos sólidos urbanos, éstos son importantes contribuyentes a las emisiones de GEI a través de la acumulación y descomposición de los mismos. Todos estos factores han contribuido al cambio climático, además de que este puede deberse también a forzamientos externos que se presentan a escalas de tiempo que incluyen variaciones en la actividad solar, del ángulo de inclinación de la órbita de la tierra, el impacto de meteoritos, así como procesos internos naturales como las actividades volcánicas, las corrientes oceánicas; y los cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra [21].

En la actualidad existen dos estrategias principales para hacer frente al cambio climático:

- Adaptación a los impactos progresivos.
- Mitigación del mismo.

La adaptación tiene que ver con hacer frente a los impactos de carácter irreversibles de este fenómeno, mismos que no se pueden evitar debido entre otros factores a las concentraciones crecientes de los GEI y su tiempo de vida en la atmósfera. Algunas de las acciones contempladas en esta estrategia son la protección económica, social y ambiental ante los cambios que provocan desastres cada vez más devastadores.

La mitigación está relacionada con la reducción de las emisiones de GEI para aminorar el calentamiento global y atenuar el cambio climático. La reducción de dichas emisiones a nivel mundial es fundamental para frenar las concentraciones atmosféricas de dichos GEI y requiere un acuerdo vinculante de orden internacional, donde participen todos los países del mundo (sobre todo los que más contaminan), bajo el principio de responsabilidades comunes compartidas pero diferenciadas, como el adoptado por la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Para enfrentar el cambio climático, se requiere de acciones en ambas áreas (mitigación y adaptación) y éstas son una necesidad imperiosa ya que este problema es cada vez más grave y más devastador [16].

#### **1.4 El Protocolo de Kyoto.**

El protocolo de Kyoto fue un acuerdo internacional orientado a enfrentar la problemática del calentamiento global. Deriva de la cumbre de Río, a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Este acuerdo fue adoptado en diciembre de 1997 en la ciudad de Kyoto, Japón y entró en vigencia en febrero del 2005. Para abril del 2010 había sido firmado y ratificado por 191 naciones [22].

El objetivo del Protocolo de Kyoto fue reducir en un 5% las emisiones de GEI en el mundo por debajo de los niveles de 1990 para el periodo 2008-2012. Ha sido el principal instrumento internacional para hacer frente al cambio climático, estableciendo mecanismos para reducir las emisiones en los países de origen y/o beneficiarse de los llamados mecanismos flexibles (Comercio de emisiones, la aplicación conjunta y el desarrollo limpio) así como contabilizar el carbono capturado por los llamados sumideros como los bosques o las tierras de cultivo. En este protocolo los países industrializados, excepto los Estado Unidos que no participó, se comprometieron a reducir sus emisiones de los seis gases de efecto invernadero originados por las actividades humanas: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorcarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Una de las principales desventajas que presentó este protocolo fue el no obligar a economías emergentes (economías no industrializadas) a regirse bajo la norma básica de reducción. Países con grandes economías como China, India, incluso Brasil con altos índices de contaminación, aunque firmaron y ratificaron el protocolo, se espera que aumenten sus emisiones en lugar de reducirlas. Por ello Estados Unidos ha justificado su decisión de no ratificar este protocolo alegando que éste no garantiza el crecimiento económico de Estados Unidos debido a la no obligación de estos países con economías emergentes [23].

Una vez vencido el principal instrumento para hacer frente al cambio climático, se han estado realizando nuevos tratados internacionales que dan seguimiento al mismo, tal es el caso de las Conferencias de las Partes (COP por sus siglas en inglés) [24], siendo el órgano

supremo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. La COP es una asociación donde están todos los países que son Partes en la Convención que se reúnen una vez al año con el propósito de supervisar y examinar la aplicación de la Convención y el Protocolo, así como desarrollar el proceso de negociación entre las partes ante nuevos compromisos [25]. Entre algunas de las funciones de la COP están: examinar periódicamente las obligaciones de las Partes, promover y facilitar el intercambio de información sobre las medidas adoptadas por las Partes, preparar los inventarios de emisiones de GEI por las fuentes y la absorción por los sumideros y medidas para reducirlas, guiar al mecanismo financiero de la Convención estableciendo políticas, prioridades y criterios para financiar actividades enfocadas a la conservación, entre otras [26].

Entre las COP que se han celebrado, se puede mencionar el decimosexto periodo de sesiones de la Conferencia de las Partes de la CMNUCC y el sexto periodo de sesiones de la Conferencia de las Partes que se celebró en Cancún y fue organizada por el Gobierno Mexicano. Entre los aspectos más destacados, las Partes acordaron: comprometerse a un aumento máximo de temperatura de 2 °C por encima de los niveles preindustriales, y considerar la reducción de ese máximo a 1.5 °C en el futuro cercano, hacer plenamente operativo en el 2012 un mecanismo de tecnología para impulsar la innovación, el desarrollo y la difusión de nuevas tecnologías amigables con el ambiente, establecer un fondo verde para el clima para proporcionar financiamiento a proyectos, programas, políticas y otras actividades en los países a través de las ventanillas de financiación temáticas en desarrollo, entre otras. También hubo un progreso de REDD, impulsando la creación de capacidad en países en desarrollo y para hacer frente a las consecuencias de medidas de respuestas a la acción del cambio climático, los gobiernos acordaron incluir la captura y almacenamiento de carbono en los proyectos de mecanismo de desarrollo limpio [27].

Para finales del año 2015 en Francia, se contempla la celebración de la 21ª reunión de la Conferencia de las Partes en la CMNUCC (COP 21) teniendo como objetivo alcanzar por primera vez, un acuerdo universal, jurídicamente vinculante que permita luchar contra el cambio climático de manera efectiva e impulsar la transición hacia sociedades y economías bajas en carbono. Para ello este acuerdo debe centrarse igualmente en la mitigación; es

decir los esfuerzos para reducir las emisiones de GEI con el fin de limitar el calentamiento global por debajo de 2 °C y la adaptación de las sociedades a los cambios climáticos existentes. Otro componente a tratar es la generación de presupuesto por parte de los países desarrollados, fuentes públicas y privadas, con el propósito de apoyar a países en vías en desarrollo para luchar contra el cambio climático, favoreciendo un desarrollo sostenible y justo [24].

### **1.5 Importancia de los bosques para el cambio climático.**

Los bosques y selvas, desempeñan una función importante dentro de los ecosistemas siendo generadores de una serie de servicios ambientales, tales como: La fijación de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, la protección de cuencas (conservación de suelo, agua y biodiversidad), la recreación, la provisión de recursos medicinales y genéticos y los valores culturales de existencia y legado, entre otros [28].

Estos bosques, además de proporcionar al hombre una abundancia de bienes y servicios, absorben y almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa. Sin embargo, algunos de los factores que contribuyen de manera importante al incremento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, son: la tala indiscriminada de grandes extensiones de bosques para la implementación de la agricultura, la ganadería extensiva, la construcción de infraestructura y urbanización, la minería y la explotación de petróleo etc. Estos procesos traen como consecuencia la pérdida de la cobertura vegetal del suelo dejando al mismo expuesto y frágil a la erosión y la desertización, causando contaminación en las cuencas de ríos y lagos, y la disminución de la biodiversidad por la extinción de miles de especies y variedades de plantas y animales, entre otros [29]. Aunado a todo esto la degradación de los bosques por la extracción de madera, los incendios, enfermedades, plagas, y la contaminación atmosférica, aunque no implica un cambio en la cobertura del suelo, también contribuye a aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Por otro lado, resultados de estudios en parcelas permanentes en bosques tropicales en América y África muestran que los bosques intactos han funcionado como sumideros de carbono en las últimas décadas, presentando un aumento en la biomasa de una magnitud casi similar a las emisiones por deforestación (aprox. 0.6 Mg C ha<sup>-1</sup> bosques amazónicos [30], o 1.3 Gt C ha<sup>-1</sup> considerando todos los bosques tropicales intactos) [31].

Son muy pocos los estudios que han cuantificado el carbono almacenado o la capacidad que tienen los bosques secundarios para capturar CO<sub>2</sub> siendo muy importantes por su cobertura ya que representan más de la mitad de los bosques tropicales [32], [33].

En relación a la importancia de los bosques en la dinámica del carbono existen dos vertientes: los bosques como emisores de carbono producto de la quema de los mismos, la deforestación y la tala, así como de la respiración de plantas, animales y microorganismos y la descomposición de la materia orgánica; y por otra parte el papel de los bosques como sumideros de carbono, reduciendo la concentración de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, mediante la capacidad que tienen de absorberlo a través de la fotosíntesis y almacenarlo en las diferentes partes estructurales de los árboles (fuste, ramas, follaje, etc.) durante largos periodos de tiempo [34]. Los bosques tropicales perennifolios pueden contener 18 a 50 veces más carbono almacenado en la biomasa aérea por unidad de área que las tierras de cultivo [35].

La captura de carbono por los bosques ha suscitado mucho interés como enfoque de mitigación, puesto que se considera un medio relativamente económico para afrontar el cambio climático. Entre 2000 y 2010, cada año 13 millones de hectáreas de bosques se convirtieron a otros usos o se perdieron debido a fenómenos naturales. Se estima que en el mundo hay 850 millones de hectáreas de bosques degradados, que podrían restaurarse y rehabilitarse para recuperar la biodiversidad y los servicios de los ecosistemas que se han perdido, y al mismo tiempo, contribuir a la mitigación del cambio climático y la adaptación a sus efectos.

Entre algunas prácticas que se pueden considerar en la gestión forestal para el aumento de la captura de carbono del sector forestal se encuentran las siguientes:

- Frenar la tala de bosques.
- Forestación, reforestación y restauración forestal.
- Incremento de la cubierta forestal por medio de la agrosilvicultura, la silvicultura urbana y la plantación de árboles en los paisajes rurales y urbanos.
- Aumento de las reservas forestales de carbono (tanto en la biomasa como en los suelos) y la capacidad de captura mediante la modificación de las prácticas de gestión y manejo forestal [36].

### **1.6 REDD+ como incentivo económico para la mitigación del cambio climático.**

La reducción de emisiones derivadas de la deforestación y la degradación forestal; además de la conservación, el manejo sostenible y el mejoramiento del almacenamiento de carbono de los bosques (REDD+) en los países en desarrollo, es una estrategia que se desarrolló bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y se basa en la idea de que el presupuesto destinado para tal fin y los mercados de carbono pueden ser utilizados para incentivar a los países en desarrollo para reducir la deforestación tropical [37]. Este mecanismo busca proporcionar incentivos económicos para mantener o restaurar los bosques como un medio para reducir las emisiones de carbono [38]. La deforestación y la degradación de los bosques contribuyen entre 12-17% de GEI por lo que la protección de los mismos es muy importante en la mitigación del cambio climático[39].

A nivel global se han desarrollado estándares internacionales para evaluar proyectos de reducción de emisiones siendo los más populares el Estándar de Carbono Voluntario (VCS por sus siglas en inglés); el Estándar de Clima, Comunidad y Biodiversidad (CCBS por sus siglas en inglés), incluyendo proyectos de deforestación evitada. Estos estándares sirven esencialmente como instrumentos de validación y verificación para la venta de créditos de carbono y otros gases de efecto invernadero para proyectos que se encuentran ya en ejecución [40]. A través de este tipo de estrategias los gobiernos asumen la responsabilidad de atraer financiamiento, diseño e implementación de políticas, distribución de beneficios y el establecimiento de líneas base para la reducción de las emisiones [41].

### **1.7 Captura de carbono.**

La captura de carbono es la absorción del CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera y su almacenamiento en bosques y otros tipos de vegetación a través de procesos físicos o biológicos. Un proceso clave es la fotosíntesis, que utiliza el CO<sub>2</sub> como materia prima para el mantenimiento, crecimiento y reproducción de las plantas. La degradación, transformación o cambio de uso de suelo para la agricultura disminuye la superficie total foliar, lo que hace que la captura de CO<sub>2</sub> sea mucho menor en comparación con los bosques originales [42].

En los bosques la fijación de carbono no se restringe solamente a las partes aéreas de los árboles, sino también a las raíces y al propio suelo, que puede almacenar cantidades

importantes por periodos de tiempo muy largos. En otras palabras, aunque se extraiga periódicamente madera del bosque, una cantidad significativa de carbono permanece almacenada en el suelo y en las raíces [43].

Factores como el fuego, el mal manejo, las plagas, etc., contribuyen a la degradación de los bosques y en consecuencia a disminuir su capacidad de captura e incrementar las emisiones de GEI a la atmósfera. Los incendios forestales emiten gases de efecto invernadero como bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{NO}_2$ ), etc. Por ello se necesitan inventarios confiables para calcular las pérdidas y ganancias de bióxido de carbono de estos ecosistemas. Los bosques que tienen crecimiento neto son capaces de capturar más  $\text{CO}_2$  del que emiten a la atmósfera a través de la respiración, mientras que los bosques maduros que crecen poco retienen el carbono ya fijado pero no fijan más y los bosques que experimentan una pérdida neta de biomasa por la mortalidad debido a la decadencia de la masa forestal se convierten en emisores de este gas [44].

La cuantificación de las reservas de carbono en los ecosistemas, especialmente en los bosques, es fundamental para la comprensión de la relación entre los cambios en el uso de la tierra y las emisiones de dióxido de carbono [45].

### **1.8 La Importancia del estudio de la biomasa en los bosques.**

La biomasa total se define como la cantidad total de materia orgánica presente en los árboles, incluyendo troncos, tocones, ramas, hojas, biomasa subterránea compuesta por raíces y biomasa muerta, que es toda la materia leñosa (muerta), ya sea en pie o en el suelo, que no forma parte de la hojarasca [46]. La cantidad de biomasa en un bosque es el resultado de la producción primaria neta es decir, la energía fijada en la fotosíntesis o producción primaria bruta, menos la energía empleada en la respiración de las plantas. Esta biomasa acumulada puede variar como resultado de las actividades humanas, los procesos de sucesión natural, la calidad de sitio, la exposición, las condiciones climáticas entre otros [47].

La producción o acumulación de nueva biomasa (productividad primaria neta) disminuye con la edad de sucesión y la edad del árbol. Sin embargo, esto no quiere decir que los bosques no fijen carbono en algunos periodos de crecimiento. Esta variabilidad que muestran los bosques naturales con respecto a las tasas de captura y almacenamiento de



carbono, sirve de base para diseñar alternativas de manejo en áreas naturales y ecosistemas forestales para aumentar su contribución al almacenamiento y a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, además, los bosques reducen las concentraciones atmosféricas de este gas al funcionar como sumideros de carbono [44], [48].

En general la importancia de la estimación de la biomasa en bosques, radica principalmente en que permite conocer el valor que tienen éstos para almacenar carbono como servicio ambiental, debido a que existe una estrecha relación entre la biomasa y el carbono de 2:1. Para determinar el papel que desempeñan los bosques ante el cambio climático, es fundamental conocer la cantidad de biomasa que pueden almacenar, lo cual también ayuda a determinar y comparar la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas forestales [49], así como a la construcción de los presupuestos globales de carbono, el diseño de políticas locales y herramientas de gestión para la captura y almacenamiento del mismo [50].

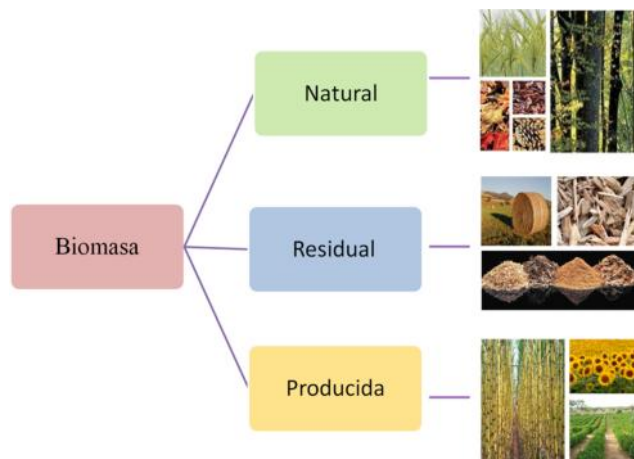
### **1.9 La biomasa como materia prima para obtención de energía renovable.**

Se considera biomasa a toda la materia orgánica de origen vegetal o animal que se encuentra constituyendo los ecosistemas de la tierra, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial. Es decir, incluye cualquier tipo de biomasa vegetal proveniente de la reacción de la fotosíntesis, que sintetiza sustancias orgánicas a partir del dióxido de carbono del aire y de otras sustancias simples aprovechando la energía solar. La biomasa es fuente de energía, de la que se pueden obtener combustibles sólidos, líquidos y gaseosos de origen animal y vegetal de organismos vivos o muertos. La biomasa puede ser clasificada en:

Natural: que es la producida por la naturaleza sin intervención humana.

Residual: generada por cualquier actividad humana, principalmente en procesos agrícolas, ganaderos, así como en la basura, aguas residuales entre otros.

Producida: que se enfoca en cultivos con el propósito de obtener biomasa transformable en biocombustibles (figura 2) [51].



**Figura 2.** Clasificación de la biomasa.

La cosecha de recursos forestales deja remanentes de madera muerta que pueden ser utilizados como materia prima para la cogeneración, estos subproductos pueden ser una alternativa disponible contribuyendo de esta manera a reducir los riesgos de incendios y mejorar la salud de los boques [52].

Esta fuente de materia prima es una reserva de energía enorme, la cual ha sido utilizada durante mucho tiempo y aún en la actualidad es fuente de energía en forma de combustible debido a que su aprovechamiento es múltiple y su combustión no contribuye en gran medida al aumento de GEI si se compara con las emisiones producto del uso de combustibles fósiles [53].

La biomasa forestal se utiliza cada vez más para producir energía. La variabilidad de los precios de los combustibles fósiles, junto con las nuevas políticas energéticas y ambientales está convirtiendo el combustible obtenido de la biomasa forestal en un elemento esencial de las políticas energéticas tanto en los países desarrollados como en desarrollo. La gran variedad de biomasa existente, unida al desarrollo de distintas tecnologías de transformación de esta energía, permiten plantear una gran cantidad de posibles aplicaciones entre las que destacan la producción de energía térmica, electricidad, energía mecánica y biocombustibles [54].

En la actualidad, la electricidad derivada de los combustibles biomásicos es considerada dentro de las nuevas y modernas formas de energía. Cabe mencionar entre éstas las calderas

de recuperación de calor, los dispositivos de cogeneración para la producción de calor y energía eléctrica, y los gasógenos de recuperación de energía de alto rendimiento [55].

La biomasa como una de las principales fuentes de materia prima es utilizada actualmente por empresas que se dedican a la biorrefinería siendo estas instalaciones o redes de instalaciones lo que integra los procesos y equipos para la conversión de la biomasa y la producción de biocombustibles para el transporte, la obtención de energía y de productos químicos [56].

### **1.10 Cuantificación de biomasa y carbono en el bosque.**

Como se ha mencionado en párrafos anteriores, uno de los depósitos más importantes del carbono en la biosfera se encuentra en los ecosistemas terrestres (en la materia orgánica vegetal viva, en la necromasa y en la materia orgánica del suelo), que en comparación con los demás depósitos del planeta es pequeño pero temporalmente muy activo. Entre tales ecosistemas, los forestales son particularmente importantes como reservorio de carbono, porque los árboles retienen grandes cantidades de este elemento por unidad de área en comparación con otros tipos de vegetación [57].

Para conocer este reservorio es necesario cuantificar la biomasa forestal, normalmente en unidades de toneladas por hectárea de peso seco. Esta cuantificación es relevante hoy en día para los bosques naturales y las plantaciones, como parte de mecanismos para mitigar el cambio climático generado por actividades antropogénicas que liberan una gran cantidad de dióxido de carbono a la atmósfera [58].

Para ello se han desarrollado varios métodos para estimar el contenido de biomasa almacenada en el carbono forestal, entre estos se pueden citar:

Método directo: llamado también método destructivo, consiste en medir las dimensiones básicas de un árbol, cortarlo y calcular la biomasa a través del pesado directo de cada uno de los componentes (raíces, fuste, ramas y follaje). Se toman muestras de madera de estos componentes del árbol y se pesan en el campo, luego se secan, se pesan de nuevo y se calcula en el laboratorio los factores de conversión a peso seco. Al final se suman los volúmenes y biomásas para obtener el volumen y biomasa total estimada del fuste o de las

ramas gruesas y de todo el árbol. A su vez, la biomasa de tallos, raíces y ramas se puede subdividir en categorías diamétricas extrapolando los resultados a grandes áreas.

Método Indirecto: es el más usual en bosques naturales pues solamente se requiere medir el diámetro normal (a 1.30 m de altura) y, en algunos casos la altura total y la densidad de la madera o su gravedad específica, como parámetros para calcular el carbono almacenado en la biomasa total de cada árbol o de todo el rodal, a partir de las ecuaciones o modelos alométricos desarrollados con el método anterior. Así, el método indirecto se basa en modelos matemáticos, los cuales son utilizados para la estimación de biomasa, generalmente para grupos de especies o bosques enteros (bosques secos, tropicales y templados): la elección del modelo dependerá de los datos que estén disponibles al momento de realizar la estimación [59].

### **1.11 Uso de ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa y carbono.**

En estudios forestales el concepto de alometría se ha utilizado para relacionar componentes o variables de difícil medición como la biomasa y el área foliar, con variables más fáciles de medir como el diámetro, la altura, el área basal entre otros. Para estimar las primeras variables en función de las segundas, normalmente el parámetro del árbol que más se ha utilizado es el diámetro normal (DN, a una altura de 1.30 m). En algunos bosques con coberturas cerradas no es fácil medir el parámetro de altura debido a que no se puede identificar la punta del árbol, sobre todo cuando las mediciones se hacen en forma indirecta [60].

La biomasa y el carbono se pueden estimar a través de varios métodos en ecosistemas forestales: 1) Estimación de la biomasa con base en los inventarios de volumen existente. 2) Estimación con base en inventarios forestales comerciales y aplicación de ecuaciones de biomasa. 3) Desarrollo de ecuaciones de biomasa e inventarios *in situ*. 4) Estimación con modelación utilizando sistemas de información geográfica [61]. La mejor aproximación a la estimación de la biomasa en una comunidad forestal se obtiene, desarrollando ecuaciones de biomasa con datos locales obtenidos de parcelas permanentes [62]. Estos modelos son denominados ecuaciones alométricas (relación matemática entre dos o más medidas) para estimar una variable (volumen o biomasa) con base en una o más variables independientes [63].

El procedimiento general para estimar la biomasa consiste en cortar varios individuos representativos de diferentes tamaños, tomar muestras de los diferentes componentes aéreos, pesar y secar submuestras de estos. La biomasa del árbol entonces es calculada extrapolando el peso seco de las muestras a todos los componentes y a todo el árbol. El número de muestras tomadas de un árbol puede variar de acuerdo al criterio del investigador [64], en cuanto a la estimación del carbono, la mayoría de los investigadores lo consideran como el 50% del total de la biomasa, sin embargo hay otros autores que determinan el 45% del total correspondiente a la misma, sin embargo, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático recomienda considerar el 50% en caso de no existir datos específicos de las especies [65].

La ecuación más común reportada en la literatura científica es la convencional logarítmica en la que la biomasa se calcula como una función logarítmica del diámetro normal (D) con los coeficientes de escala y pendiente. Ésta es una ecuación empírica por naturaleza ya que los coeficientes escalares no son conocidos y se estiman generalmente por procedimientos de mínimos cuadrados en regresión lineal. Las ecuaciones empíricas más actuales contienen el valor de la gravedad específica de la madera ( $w$ ) y la altura del árbol (H) además del diámetro normal como variables independientes [66].

La cantidad de biomasa aérea es importante en la evaluación de otros depósitos de biomasa, ya que se correlaciona con la ubicada bajo el suelo, raíces, hojarasca y necro-masa y es de más fácil obtención [67]. El estudio de la biomasa es fundamental para conocer la cantidad de bioenergía como alternativa parcial a los combustibles fósiles en la producción limpia y sostenible de la misma, así como su contribución en la problemática ambiental mundial, ya que los ecosistemas forestales contribuyen al ciclo global del carbono, y ayudan a mitigar los efectos del cambio climático [68].

### **1.12 Bosques tropicales y su importancia en el ciclo global del carbono y la mitigación del cambio climático.**

Los bosques tropicales se encuentran dentro de la zona climática húmeda tropical con precipitaciones entre los 500 hasta los 9000 mm/año aproximadamente y temperaturas promedio anuales superiores a 18 °C [69], estos ecosistemas pueden variar debido a las diferencias climáticas de temperatura, precipitación, etc, así como también por las

características de suelo como el drenaje, el pH, la profundidad, entre otras. Algunas de las características generales de estos bosques son: la gran cantidad de especies, los árboles son similares en apariencia generalmente con tallos rectos y delgados, que se ramifican cerca de la punta, la mayoría tienen hojas grandes, la vegetación herbácea es escasa y a menudo hay poca hojarasca, el crecimiento y la producción de plantas es continuo generalmente ocurriendo en altitudes inferiores a los 1300 msnm [69]. Estos ecosistemas ocupan solo el 7% de la superficie terrestre, pero albergan el 70% de las especies de animales y plantas en el mundo [70].

Entre las principales funciones desempeñadas por los bosques tropicales, están: la mitigación al cambio climático reduciendo las concentraciones de GEI que se encuentran en la atmósfera, la protección de suelos por interceptación de la precipitación, con la acción estabilizadora que ejercen las raíces de las plantas y con la cobertura de hojarasca que reduce la erosión; regulación de la humedad relativa y la temperatura; la protección de las especies de animales y vegetales; también regulan la absorción, reserva y liberación de oxígeno y de elementos minerales, la absorción y transformación de la energía luminosa y química, de igual manera generan un número sustancial de bienes y servicios que benefician al hombre, clasificándose de la siguiente manera: valores de uso directo: provisión de medicinas, alimentos, madera y leña, la extracción de material genético, el turismo, entre otros; valores de uso indirecto como la protección de cuencas hidrográficas, almacenamiento de carbono, regulación del clima, conservación de la biodiversidad y regulación de la cantidad y calidad de agua, etc [71].

Estos ecosistemas albergan casi el 37% del carbono de los ecosistemas forestales a nivel mundial[72]. Por lo que es de gran importancia conocer la distribución espacial de la biomasa para estimar las fuentes y sumideros de carbono a través del tiempo [73].

Existe un alto grado de incertidumbre sobre la cantidad de biomasa que almacenan los bosques tropicales. Por lo tanto la delimitación precisa de la distribución en la biomasa a escala local, regional y global es imprescindible para reducir la incertidumbre de las estimaciones de emisiones y la captura de carbono así como la mitigación al cambio climático [74].

En general los bosques secundarios han sido poco estudiados, de ahí la importancia de implementar estudios para conocer los cambios graduales y temporales en la estructura y composición florística posterior a las perturbaciones antropogénicas [75], [76].

### **1.13 Bosques tropicales secos sus características e importancia.**

Actualmente, con el avance de la frontera agrícola, la expansión de las áreas urbanas y la extracción forestal selectiva se resalta la vulnerabilidad a la que el carbono forestal de diversos ecosistemas está sometido. En este contexto, el bosque tropical seco ha sido uno de los de mayor afectación, y por ello uno de los que mayormente pudieran emitir CO<sub>2</sub> a la atmósfera [77].

Los bosques tropicales secos (BTS) se caracterizan por presentar una estación seca de varios meses con poca o ninguna precipitación, además de contener una biodiversidad única y un alto grado de endemismo [78]. Estos bosques son globalmente muy amplios pero poco estudiados, sobre todo desde una perspectiva de ciclos biogeoquímicos. Históricamente, gran parte de la tierra cubierta por bosques tropicales secos se ha desmontado para la agricultura u otros usos de la tierra, pero los bosques ahora se están regenerando en algunas áreas [79].

Los BTS presentan menor riqueza de especies, árboles de menor altura, área basal con valores bajos y pocos estratos de dosel, en comparación con los bosques tropicales húmedos [76]. Los procesos de reproducción, crecimiento, productividad primaria, producción de hojarasca, materia orgánica y el ciclo de nutrientes están fuertemente relacionados a la estacionalidad y exhiben, en general bajos valores comparados con los bosques húmedos [80]. A causa del periodo de sequía que presentan estos ecosistemas son susceptibles a incendios forestales debido al alto grado de acumulación de materia orgánica seca, así como a las prácticas de quema ejecutadas por los agricultores como parte del sistema tradicional de roza-tumba-quema, para el establecimiento tanto de milpas como de pastos para ganadería [81].

Este tipo de vegetación tiene una gran importancia ya que abarca el 42% de los bosques tropicales a nivel mundial y cerca del 49% de los bosques de Mesoamérica; además suministran servicios ecosistémicos importantes para el bienestar humano [82] y se estima que representan aproximadamente el 5% del carbono en la vegetación y suelo en los

ecosistemas terrestres[83]. Son uno de los principales ecosistemas más amenazados de la biósfera [84]. Grandes áreas de bosques tropicales secos han sido talados debido a que tanto el clima y los suelos son adecuados para muchos tipos de agricultura y ganadería [85]. Se estima que el 48.5% de la superficie total de los bosques tropicales secos se ha convertido a otros usos de la tierra [86]. Estos ecosistemas han sufrido grandes perturbaciones por actividades humanas, por lo que es prioridad evaluar su capacidad de almacenamiento de carbono, especialmente los secundarios o degradados [87].

En la actualidad, la distribución de estos bosques tropicales secos representa solo una fracción de su cobertura original; por ejemplo, en México menos del 27% de la distribución original de este ecosistema permanecía en buen estado a principios de la década de 1990, siendo la principal causa de su pérdida la conversión de los bosques a pastizales y campos de cultivos [88]. En la Península de Yucatán, México, los bosques tropicales estacionalmente secos están expuestos a actividades humanas de perturbación por lo que la superficie ocupada por bosques secundarios es cada vez más mayor [72].

Para poder hacer uso o manejo más apropiado de los bosques secundarios es necesario entender los factores que afectan su estructura, diversidad, composición, dinámica y funcionamiento [89].

#### **1.14 Factores que afectan la biomasa y el carbono en los bosques tropicales.**

Los bosques tropicales son los ecosistemas vegetales con mayor biodiversidad y con una alta capacidad de reducir las concentraciones de GEI de la atmósfera [90]. El incremento en la demanda de recursos naturales para satisfacer a las poblaciones humanas está cambiando rápidamente la estructura y dinámica de los bosques primarios, estos procesos han conducido a una disminución y pérdida progresiva de los bosques maduros del mundo [91]. Entre algunas principales causas de degradación de los suelos, pérdida de biodiversidad y producción de GEI a nivel mundial están; la deforestación y la fragmentación de ecosistemas naturales, los cuales son reemplazados por sistemas agropecuarios [7].

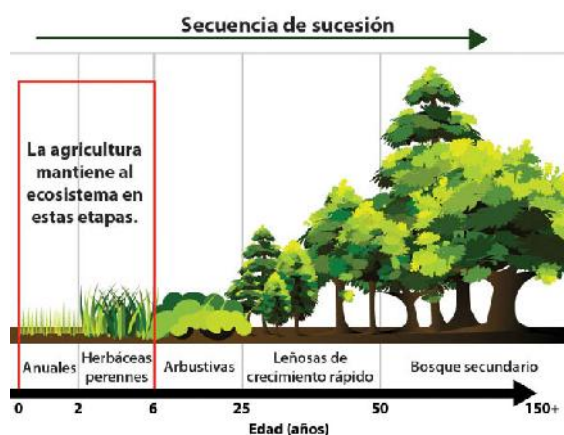
Además, hay varios factores que afectan a la vegetación, como los ecológicos, entre estos los climáticos, como por ejemplo la precipitación, la radiación solar, el viento; factores edáficos como la profundidad de los suelos, la fertilidad, la capacidad de retención de agua; factores fisiográficos como la orografía, altitud, pendiente, exposición entre otros [92].



El estudio en los bosques tropicales es necesario para entender algunos de los procesos que determinan la estructura, funcionamiento y el comportamiento de estos bosques. Conocer su diversidad biológica, así como estos procesos, resulta prioritario para poder desarrollar acciones de conservación efectivas de estos ecosistemas [93].

### 1.14.1 Sucesión secundaria.

El término sucesión frecuentemente es utilizado para describir cambios en diferentes tipos de vegetación en escalas temporales y espaciales [94]. Los cambios temporales en la estructura y composición que experimentan las comunidades vegetales a medida que se recuperan de disturbios a escalas mayores a una hectárea, tales como huracanes, incendios o la conversión de bosques a terrenos agropecuarios, se conoce como sucesión secundaria (Figura 3) [95].



**Figura 3.** Secuencia de la edad de sucesión en bosques tropicales [96].

Dos atributos importantes de la estructura de los bosques que cambian a través de la sucesión son: la biomasa aérea y la diversidad de especies [76]. La primera se refiere al peso seco de todas las plantas, sin incluir las raíces, y es muy importante ya que en ella se almacena una gran cantidad de carbono [97], mientras que la segunda es un indicador simple y ampliamente utilizado de la biodiversidad que influye notablemente en el funcionamiento y la capacidad de los ecosistema para proveer servicios ecosistémicos [98]. Los bosques tropicales maduros están desapareciendo, mientras que los bosques tropicales secundarios están aumentando en cobertura, por ello es de gran importancia y una necesidad el comprender la ecología de estos ecosistemas [72]. La comprensión de la

sucesión del bosque tropical es fundamental para el desarrollo de estrategias de conservación y manejo, dado que los bosques tropicales secundarios pueden ser considerados los bosques del futuro [99]. Grandes áreas han sido deforestadas por el cambio de uso de la tierra en los trópicos húmedos, y posteriormente son abandonadas, a veces de manera casi inmediata. Estas áreas con el tiempo se recolonizan de vegetación y fauna a través de la sucesión secundaria. La regeneración de la vegetación después de una perturbación proviene de varias fuentes: las semillas que se dispersaron y se mantuvieron viables en el suelo antes de la perturbación y las semillas que son dispersadas en el área después de la perturbación, así como el banco de plantas o árboles remanentes y de los meristemas como rizomas, tocones, etc [100]. Las perturbaciones o disturbios humanos, así como las naturales (huracanes, incendios, inundaciones, sequías, etc.) siempre han sido una parte integral de la dinámica de los ecosistemas forestales, a tal punto que no existe una distinción clara entre la vegetación secundaria y la madura. Esta estructura y dinámica de la vegetación forestal reflejan una compleja interacción de eventos de perturbación y los procesos de regeneración que tienen lugar a través del tiempo y el espacio, interpretándose en términos de cómo los bosques han respondido a los regímenes de perturbaciones recientes e históricos. Los patrones de variación de los bosques tras una perturbación son determinados por un conjunto complejo de interacciones entre los factores locales del sitio, la historia y estructura del paisaje, la diversidad de especies (incluidas las especies no autóctonas) y el comportamiento de estas especies [76].

Todos estos procesos pueden ser entendidos a través de las fases de sucesión. La primera fase se ha denominado etapa de iniciación (0-10 años) y en ella se dan procesos como la germinación del banco de semillas así como de las semillas recién dispersadas, aparición de rebrotes de árboles remanentes, comienza la colonización por especies pioneras, rápido crecimiento en altura y diámetro de especies leñosas, alta mortalidad de especies herbáceas, establecimiento de plántulas de especies tolerantes a la sombra. La segunda fase se denomina exclusión de tallos (10-25 años), en la cual hay un cierre del dosel, alta mortalidad de lianas y arbustos, comienza el reclutamiento de plántulas tolerantes a la sombra, así como la disminución del crecimiento de las especies intolerantes, alta mortalidad de especies pioneras, desarrollo del dosel y estratos de especies de sotobosque,

así como el reclutamiento de especies de árboles y palmeras tolerantes a la sombra en el sub-dosel. En la tercera fase, llamada de reinicio del sotobosque (25 a 100 años) se encuentran especies con mayor tolerancia a la sombra, resistencia y larga vida, los árboles pioneros intolerantes a la sombra mueren y se producen los claros de dosel, reclutamiento y madurez reproductiva de especies tolerantes a la sombra así como la aparición de árboles de sub-dosel y especies de palmeras, aumento de la heterogeneidad y de especies tolerantes a la sombra en el sotobosque [101].

Un método clave para la investigación relacionada con la sucesión de bosques secundarios son los estudios de cronosecuencia [76], siendo esta la caracterización de los cambios sucesionales en la estructura de la vegetación, la riqueza de especies y composición de las mismas en los bosques tropicales [102]. Este método también es conocido como reemplazo de tiempo por espacio, y consiste en el establecimiento de parcelas permanentes de estudios en un área que presente diferentes edades de sucesión; la caracterización de estas parcelas una sola vez en el tiempo permite deducir los cambios que han ocurrido a través del tiempo. Este es el método práctico y el más utilizado, ya que no requiere de un largo tiempo de estudio, sin embargo el principal problema es que asume que las diferencias que se observan entre las parcelas se deben principalmente a la diferencia de edad que existe entre ellas y que todas están siguiendo el mismo patrón. Existen métodos alternativos al de cronosecuencia como son: el monitoreo a largo plazo de parcelas permanentes desde el inicio de la sucesión. Este método es el más directo y consiste en el establecimiento de parcelas inmediatamente después del disturbio natural o en el momento en que se abandona las tierras después de un uso agrícola o pecuario. Este método permite investigar los cambios reales que ocurren a lo largo de la sucesión, sin embargo una de las desventajas es que requiere mucho tiempo para su estudio (décadas o siglos).

Un tercer método de estudio que puede ser una combinación entre los dos anteriores es el monitoreo en cronosecuencia. Consiste en establecer una cronosecuencia y después monitorearlas a lo largo del tiempo durante varios años y así poder ver cuál es la trayectoria real de cada parcela y comparar si estas trayectorias individuales corresponden o no al patrón general inferido de la cronosecuencia.

Con base en la información del enfoque de cronosecuencia, se pueden caracterizar estructuralmente las comunidades vegetales e inferir los cambios ocurridos a través del tiempo. De igual manera puede servir como base para la parametrización de modelos para proyectar la recuperación de los bosques tropicales en términos de biomasa, posteriormente a perturbaciones antropogénicas y naturales [103].

Los cambios en la estructura del bosque, la composición de especies, y la función del ecosistema durante la sucesión se producen a ritmos muy diferentes [102]. De manera general la sucesión de bosques secundarios es influenciada por eventos azarosos que afectan la estructura, composición y funcionamiento de los ecosistemas, así como por la biología de las especies, y sus interacciones con otras ya sea entre las plantas, o entre las plantas y animales, y por la interacción de los componentes bióticos y abióticos (vegetación y clima). Todos estos factores determinan en última instancia una composición florística particular a una edad determinada (etapa) y también influyen en el grado de recuperación funcional y estructural de la vegetación original [104]. Otros elementos como la configuración espacial del paisaje, especialmente el grado y el estado de los bosques circundantes, también puede afectar fuertemente la recuperación de la biomasa, la riqueza y la composición de especies [105].

En síntesis el estudio de sucesión secundaria es muy importante no solo por el hecho de que permite la recuperación de los ecosistemas naturales, sino porque en sus fases se encuentran una serie de componentes biológicos que pueden ser de utilidad para el hombre, como por ejemplo la existencia de grupos de especies de rápido crecimiento, así como algunos grupos adaptados a condiciones extremas que pueden resultar susceptibles de explotación, entre otros [75].

#### **1.14.2 Topografía.**

Es bien conocido en la literatura que la topografía puede influir en la dinámica de los nutrientes del suelo en las regiones templadas, pero para los bosques tropicales, y específicamente para bosques tropicales secos, esta fuente de variación ha sido poco considerada [106] [107] [78]. La naturaleza de estas variaciones puede depender del tipo de suelo, que a su vez, está estrechamente vinculado a la topografía local o regional, afectando la variabilidad en la absorción de carbono, biomasa y diversidad de especies [106].

La influencia de la topografía sobre la vegetación es indirecta y está mediada por factores edáficos como la capacidad de retención de agua y la vulnerabilidad a la erosión; también afecta la cantidad de radiación recibida, la cual puede aumentar o disminuir según la exposición, así como la velocidad de propagación de incendios. Otros aspectos como la forma de la ladera (cóncava, recta o convexa) también influyen en la vegetación. En las laderas (cóncavas, recta o convexa) habrá mayor profundidad de suelo y más humedad, al predominar el depósito sobre la erosión, al contrario que en las pendientes convexas en las que al haber mayor facilidad de esorrentía, habrá más erosión y suelos más pedregosos y menor capacidad de retención de agua [92]. Estos aspectos podrían afectar la estructura y composición de la vegetación, de manera que la altura de dosel y el diámetro de los árboles podrían ser menores en colinas debido a la menor disponibilidad de suelo, agua y nutrientes comparado con zonas planas, por lo que la densidad y composición de las especies también podrían ser diferentes [107]. Sin embargo, también es importante considerar el uso del suelo, ya que los agricultores hacen mayor uso de zonas planas que de cerros, por lo que los cerros pueden albergar vegetación de mayor edad de sucesión, y por lo tanto mayor biomasa que sitios planos con vegetación más joven [80].

En general, las condiciones topográficas son claves para la selección de sitios para llevar a cabo las actividades humanas, ya que afectan la facilidad de acceso y mecanización entre otros factores [92]. Es complejo establecer relaciones causales entre la topografía y los diferentes componentes en los ecosistemas debido a que la topografía es una variable que se relaciona con otras, como el tipo de suelo [108], la apertura del dosel [109] y el potencial hídrico del suelo [110], así como también con la dinámica del bosque y el ciclo de nutrimentos [106]. Algunos estudios como el de Gong *et al.* [111] evaluaron el efecto que tiene la pendiente en la productividad y la composición de especies de pastizales en China, y reportan que la biomasa aérea fue mayor en laderas con exposición norte en relación con las laderas con exposición sur; esto podría deberse a la mayor radiación solar en laderas que presentan exposición sur, lo cual podría disminuir la disponibilidad de agua en comparación con las laderas que tienen exposición norte.

Sternberg *et al.* [112] encontraron que la exposición de la pendiente tuvo efectos significativos en la composición, estructura y densidad de las comunidades de plantas así

como la biomasa aérea en sitios semiáridos y áridos de Israel. Estos componentes fueron mayores para aquellas laderas que presentaban una exposición norte en relación con laderas con exposición sur. Los autores atribuyen estos cambios a la diferencia en las precipitaciones y la densidad de radiación entre los sitios, lo que suponen que las diferencias de vegetación están relacionadas con la disponibilidad de recursos, en particular la disponibilidad temporal de agua en los suelos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Estimar el carbono almacenado en la biomasa aérea en la selva tropical mediana sub-caducifolia en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic en Yucatán, México y evaluar la influencia de la edad de sucesión y la condición topográfica sobre la biomasa aérea.

### **Objetivos Específicos**

1. Evaluar la relación entre la biomasa aérea y la edad de sucesión o tiempo de abandono de la vegetación después de un uso para agricultura tradicional en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic y determinar en qué categoría de edad se encuentra mayor biomasa.
2. Evaluar la relación entre la biomasa aérea y la pendiente, y determinar la condición topográfica que mayor contenido de biomasa tiene.
3. Identificar las especies que más contribuyen a la biomasa en las distintas condiciones analizadas (categorías de edad sucesional y condiciones topográficas).

## **PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿Cuál es la cantidad de carbono almacenado en la biomasa aérea en la selva tropical mediana sub-caducifolia de la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic?
2. ¿Cómo varía la biomasa aérea y la contribución de las especies a ésta, en función de la edad de sucesión y la topografía en la Reserva?
3. ¿Cuáles son las especies que más contribuyen a la biomasa aérea en la reserva, en general y para cada condición analizada (categoría de edad sucesional y condición topográfica)?



## **HIPÓTESIS**

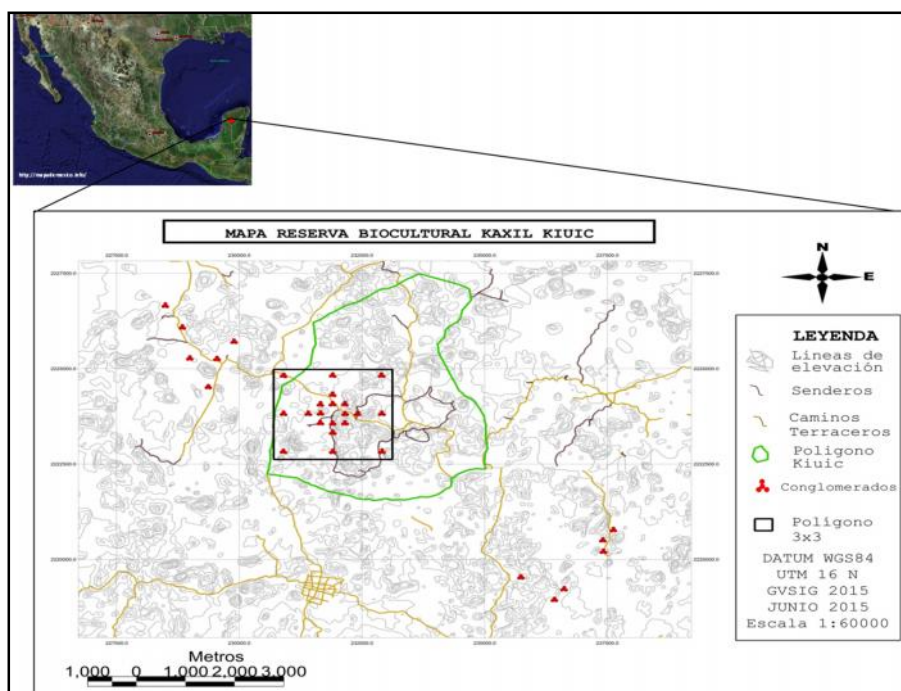
1. Dado que el tamaño de los individuos aumenta paulatinamente con la edad de sucesión y tiene un efecto mayor en la biomasa y el carbono aéreo almacenados, que la densidad de individuos (la cual es mayor en edades jóvenes, pero tiende a disminuir posteriormente), se espera que la biomasa y el carbono aéreo almacenados aumenten rápidamente en edades tempranas y más lentamente en edades intermedias y avanzadas.
2. Dado que en zonas donde hay cerros, los suelos son más someros, presentan mayor pedregosidad y menor disponibilidad de agua, se esperaría que en estas zonas haya menor biomasa y carbono aéreo almacenados que en zonas planas.
3. Dado que la disponibilidad de agua es el principal factor limitante para el crecimiento en las selvas secas, y que las laderas de los cerros orientadas hacia el sur reciben mayor radiación solar y por lo tanto tienen una mayor evapotranspiración que las orientadas hacia el norte, se esperaría que la biomasa y carbono aéreo almacenados sean menores en las zonas con exposición sur que con exposición norte.

## CAPITULO II

### 2. MATERIALES Y METODOS

#### 2.1 Localización del área de estudio.

El presente estudio fue realizado en la Península de Yucatán, específicamente en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic (Figura 4), Municipio de Oxkutzcab, al sur-occidente del Estado de Yucatán, México, en la región de colinas y valles conocida como Puuc [113], entre 20° 01' 7"-20° 09' 36" latitud Norte, 89° 35' 59"-89° 23' 31" latitud Oeste [114].



**Figura 4.** Mapa de la ubicación geográfica de la Reserva Estatal Biocultural Kaxil-Kiuic, al sur de Yucatán, con los 32 conglomerados contemplados en la presente estudio.

La zona corresponde a una reserva privada y su nombre se debe a que dentro de la misma se conserva la diversidad biológica y cultural debido a la existencia de zonas arqueológicas de la cultura maya. Esta es una zona de gran importancia ya que presenta una buena extensión de selva en buen estado de conservación. Además, forma parte de la Reserva Estatal Biocultural del Puuc y de una de las áreas prioritarias para acciones tempranas de REDD+ de la alianza México-REDD+ [115]. El clima según la clasificación propuesta por Köppen modificada por García [116] es del subtipo Aw0(i)gw" el más cálido y más seco

de los subhúmedos con poca oscilación entre 5 y 7 °C, con marcha anual de la temperatura tipo Ganges y sequía intraestival o canícula. Presenta una marcada estacionalidad, la temperatura media anual es de 26 °C y la precipitación anual oscila entre 1,138 y 1,440 mm y ocurre predominantemente entre los meses de mayo y octubre (75% de la precipitación total) [113]. Considerando estos valores de temperatura y precipitación, el tipo de vegetación que caracteriza a esta región corresponde a bosques secos particularmente a la selva mediana subcaducifolia [117].

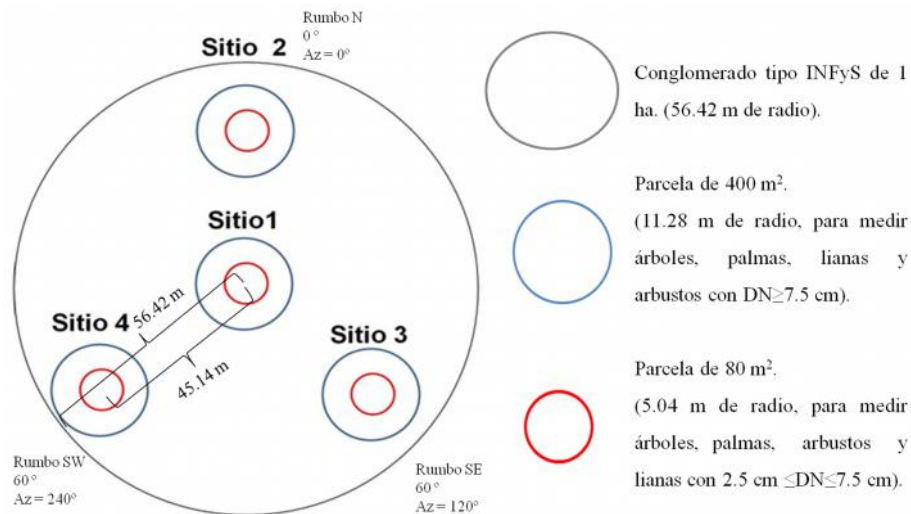
La zona está dominada por bosques tropicales semi-decíduos estacionalmente secos (50% - 75% de especies pierden sus hojas durante la estación seca) de diferentes edades de abandono después de un uso de agricultura tradicional con el método de roza-tumba-quema. El bosque tiene una estatura de dosel relativamente baja (8-13 m) con unos pocos árboles prominentes que alcanzan 15-18 m el más maduro (80-100 años de edad). Entre las especies más abundantes se encuentran: *Neomillspaughia emarginata* (Gross) Blake, *Gymnopodium floribundum* Rolfe, *Bursera simaruba* (L.) Sarg, *Piscidia piscipula* (L.) Sarg y *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth [118]. El área de estudio presenta paisajes con cultivos permanentes, milpa tradicional, bosque conservado y secundario; en la región, el mayor aprovechamiento es para la práctica tradicional maya de agricultura conocida como milpa, basada en el cultivo de maíz, calabaza y frijol.

El relieve del paisaje está formado por áreas planas y elevaciones menores a los 200 metros de altura (cerros). Los suelos característicos en la región son litosol (es un suelo sin desarrollo y con una profundidad menor a 10 cm) y luvisol (suelo moderadamente ácido y por presentar acumulación de arcilla en el subsuelo de color rojo) y en menor grado se presenta un tercer tipo de suelo conocido como Rendzina, que presenta en la parte superficial partículas principalmente arcillosas [119]. Para el caso de zonas onduladas con montículos se presentan por lo regular una doble asociación; los suelos litosoles se encuentran en pendientes, montículos y cerros, los suelos conocidos como Rendzina se encuentran partes elevadas, mientras que en zonas más planas se pueden encontrar los suelos luvisoles y cambisoles. Así en el estado de Yucatán a cada condición topográfica del paisaje le corresponde una asociación particular de suelos [119].

## 2.2 Metodología utilizada para el muestreo en campo.

Para llevar a cabo el levantamiento de datos en campo se tomó como base la metodología aplicada por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos INFyS de la Comisión Nacional Forestal [120]. Esta metodología está compuesta por unidades de muestro de una ha "conglomerados" conformados por cuatro parcelas o sitios circulares de 400 m<sup>2</sup> (Figura 5) distribuidos en forma de "Y" invertida, donde se midieron los árboles, palmeras y lianas con diámetro normal (DN a 1.3 m de altura) mayor o igual a 7.5 cm. Cada sitio tiene una parcela concéntrica más pequeña de 80 m<sup>2</sup> donde se midieron los árboles, palmeras, lianas y arbustos con DN mayor o igual a 2.5 cm. Los sitios 2, 3 y 4 están ubicados a una distancia de 45.14 m del centro del sitio 1 y 56.42 m a la orilla de estos. En cada uno de estos sitios se midieron individuos vivos y muertos en pie.

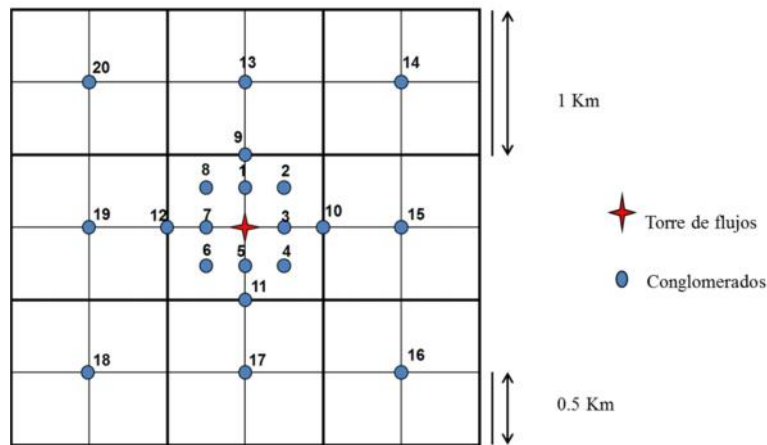
Para el registro de la información de los árboles muertos en pie, se clasificaron en tres categorías: 1 para árboles muertos en pie que presentaban ramas gruesas y delgadas, 2 para árboles muertos en pie que presentaban sólo ramas gruesas y 3 para árboles muertos en pie que presentaban sólo el tronco [121].



**Figura 5.** Metodología utilizada para el levantamiento de datos en la reserva Kaxil-Kiuc, Yucatán, México (basado en el diseño del INFyS modificado para la red MEX-SMIC) [122].

En total se establecieron 32 conglomerados distribuidos de la siguiente forma: 20 conglomerados ubicados de manera sistemática estratificada dentro de un área de 9 km<sup>2</sup>

(Figura 6) alrededor de una torre de flujo de covarianza de torbellinos (Eddy covariance en inglés), de los cuales 12 conglomerados se establecieron dentro del kilómetro cuadrado que incluye la torre; y los ocho restantes en los kilómetros cuadrados circundantes. El propósito de esta distribución es relacionar las mediciones de los conglomerados con las de la torre y con información de sensores remotos.



**Figura 6.** Conglomerados dentro de un área de 9 km<sup>2</sup> ubicados alrededor de la torre de flujo de covarianza de torbellinos (elaborado por el Dr. Juan Manuel Dupuy 2013).

Los restantes 12 conglomerados se establecieron en una cronosecuencia de edades de sucesión de los 3 a los 25 años. Para ello se identificaron sitios alrededor de la reserva que presentasen este rango de edades de sucesión y que estuviesen disponibles para ser estudiados por varios años, sin que se practique ningún tipo de manejo en ellos. Estos conglomerados se agruparon en tres categorías de edad de la siguiente manera: cuatro conglomerados para la categoría 1 con edades entre 3-5 años; cuatro conglomerados para la categoría 2 con edades entre 10-17 años; cuatro conglomerados para la categoría 3, con edades entre 18-25 años y por último la categoría cuatro relacionada con los conglomerados que están dentro del área del 3x3 km conformada por 20 conglomerados con edades mayores a 25 años [118].

Los parámetros que se recolectaron en campo fueron los siguientes: nombre común o científico de la especie, forma de crecimiento (árbol, arbusto, palma o liana), condición (vivo, muerto, tocón), DN (cm), altura total (m), longitud total (m) área de copa (m<sup>2</sup>), así

como categoría de árbol en pie muerto (1 para árboles muertos en pie con ramas gruesas y delgadas, 2 para árboles muertos en pie con ramas gruesas y 3 para árboles muertos en pie sin ramas). Se colocó una placa enumerada a cada individuo, así como a los tallos que presentaba cada uno de estos. De esta manera, para este estudio se consideraron 128 parcelas circulares de 400 m<sup>2</sup> (incluyendo las de 80 m<sup>2</sup>), para un área total muestreada de 5.12 ha.

### 2.3 Estimación de la biomasa en el área de estudio.

La estimación de la biomasa aérea se calculó a partir de modelos matemáticos (ecuaciones alométricas) utilizadas para bosques tropicales de México; para árboles con DN mayor a 10 cm se utilizó la ecuación alométrica descrita por Urquiza y colaboradores (2007). Para árboles y arbustos con DN iguales o mayores a 2.5 cm y menores a 10 cm se utilizó la ecuación alométrica descrita por Chave y colaboradores (2003). La biomasa aérea de las lianas fue estimada utilizando la ecuación alométrica descrita por Chave y colaboradores (2003), mientras que el modelo matemático que se utilizó para la estimación de la biomasa aérea para palmeras fue el descrito por Frangi y Lugo (1985) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Ecuaciones alométricas utilizadas para la estimación de biomasa en la Reserva Kaxil-Kiuic.

Parámetro	Ecuación Alométrica	R <sup>2</sup>	Fuente	Año
DAP 10cm	$Y = \exp(2.173 + 0.868 \ln(D^2 TH) + 0.939/2) * i / m$	0.9	Urquiza <i>et al.</i>	2007
1<DAP<10cm	$Y = i / AV(\exp(4.9375 + 1.0583 \ln(D^2))) CF / 106$	0.93	Chave <i>et al.</i>	2003
Lianas	$\ln(AGB) = 0.049 + 2.053 \ln(D)$		Chave <i>et al.</i>	2003
Palmeras	$\ln(AGB) = 4.5 + 7.7(H) / 103$	0.9	Frangi y Lugo	1985

**Donde:** Y= Biomasa en kg para tallos con DAP 10 cm y lianas; biomasa en Mg para tallos con 1<DAP<10 cm y palmas; D=diámetro (cm) a la altura de 1.30 m, TH=altura total de cada árbol en m; H=altura en m;  $i$ =densidad de la madera de cada especie,  $m$ =Densidad promedio de las especies presentes en el paisaje, CF=Factor de corrección (1.14); [123], [124], [125].

Los valores de densidad de la madera para cada una de las especies vivas presentes en el paisaje, se obtuvieron a través de una revisión bibliográfica; para aquellas especies para las que no se encontraron valores, se les asignó el valor promedio de densidad de las especies

presentes en el paisaje. Para los valores de densidad de la madera de individuos muertos se utilizó las categorías propuestas por el INFyS (1, 2, 3, 4 y 5), siendo la categoría 1 la de menor grado de descomposición de la madera y la 5 la de mayor grado de descomposición [126]. En este trabajo se asignó el promedio de la categoría 1 para árboles muertos en pie con ramas gruesas y delgadas, el promedio de la categoría 3 para árboles muertos en pie con ramas gruesas y el promedio de la categoría 5 para árboles gruesos en pie sin ramas.

La estimación de la pendiente se realizó a través de mediciones directas en campo utilizando instrumentos como el vertex y brújula para ubicar la orientación de la misma. Primeramente se identificaron aquellas parcelas que se encuentran en zonas de pendiente, se determinó en campo el aspecto u orientación predominante de las mismas, se tomó el azimut con la brújula y se realizaron transectos de medición utilizando el vertex, iniciando desde la parte más baja de la pendiente (borde de la parcela de 400 m<sup>2</sup>) hacia la parte más alta tomando varios puntos (bordes de la parcela de 80 m<sup>2</sup> y centro de la parcela), también se trazaron transectos perpendiculares a la pendiente predominante. Con los datos recabados en campo se obtuvo un valor promedio de pendiente de cada parcela, y se realizó la siguiente clasificación: sitios planos con pendientes promedios menores al 10%, sitios en cerros con pendientes promedios mayores o iguales al 10% con exposición norte y sitios en cerros con pendientes promedios mayores o iguales al 10% con exposición sur.

Las edades que corresponden a cada parcela en cada uno de los conglomerados se obtuvieron a través de consultas directas a los dueños o a las personas que trabajaron la tierra.

#### **2.4 Estimación de la biomasa y el CO<sub>2</sub> capturado en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.**

La cantidad de dióxido de carbono que absorben las plantas se puede calcular a partir de la biomasa, considerando que la composición de la madera es similar en las distintas especies leñosas de igual manera que dentro de un mismo árbol en sus diferentes partes. Todas las maderas contienen aproximadamente el 50% del carbono [127]. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático recomienda en caso de no existir datos específicos, considerar también este porcentaje.

El CO<sub>2</sub> capturado por la Reserva Kaxil-Kiuic se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$CO_2 = (B \times 0.5) \times 3.67$$

**Donde:** B es la biomasa, 0.5 es el factor de carbono propuesto por Kollman [127] y 3.67 es la relación entre el peso de la molécula de CO<sub>2</sub> y la de carbono.

## 2.5 Análisis estadísticos.

Primero se realizó un análisis exploratorio de los datos para identificar su distribución, tendencia central, dispersión y comportamiento. Una vez conociendo el comportamiento de los datos fue necesario realizar las transformaciones adecuadas para cumplir con los supuestos de normalidad. Para obtener el mejor modelo de ajuste en el análisis de regresión lineal múltiple y conocer el comportamiento de la biomasa aérea en relación con las variables independientes, edad de sucesión y condición topográfica, fue necesario transformar con logaritmo natural (LN) la variable dependiente o explicativa así como la edad de sucesión, mientras que para la variable independiente (pendiente) fue necesario la transformación al cubo de la misma.

Posteriormente se realizó una regresión parcial múltiple para determinar el porcentaje de variación que explicaron las variables independientes en conjunto así como por separado.

Para el análisis de regresión lineal simple fue necesario transformar la biomasa aérea total y la edad de sucesión con LN, mientras que para la biomasa aérea viva se transformó con LN, así como la transformación al cubo de la variable dependiente (edad de sucesión). Para el análisis de regresión lineal simple entre la biomasa aérea y la topografía, fue necesario transformar la pendiente con una potencia (cuadrado o cubo).

Las variables de edad y pendiente se clasificaron en categorías y se utilizaron pruebas de ANOVA de un solo factor para ver si existen diferencias significativas entre categorías; se realizó un análisis *post hoc* utilizando pruebas de Tukey para identificar las categorías de edad que presentaron diferencias significativas. Por último, se identificaron las especies que aportan mayor biomasa aérea a la reserva en general así como a cada una de las condiciones analizadas. Los análisis estadísticos se realizaron en el programa SPSS 16.0.



## CAPITULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se registró un total de 4,991 individuos pertenecientes a 160 especies y 42 familias siendo la Fabaceae la más abundante con 1,395 individuos, seguido de Polygonaceae con 538, Rubiaceae con 416, Sapindaceae con 306, Ebenaceae con 284, Burseraceae con 246 individuos, entre otras. Los diámetros de tallo se distribuyeron entre 2.5 hasta 82.5 cm. Las especies con mayor abundancia de individuos fueron: *Lonchocarpus xuul* Lundell (Fabaceae) con 261, *Bursera simaruba* (Burseraceae) con 246, *Thouinia paucidentata* Radlk (Sapindaceae) con 225, *Lysiloma latisiliquum* (Fabaceae) con 208, *Gymnopodium floribundum* (Polygonaceae) con 199, *Piscidia piscipula* (Fabaceae) con 192, *Coccoloba spicata* Lundell (Polygonaceae) con 180, *Caesalpinia gaumeri* Greenm (Fabaceae) con 153, entre otras.

#### 3.1 Biomasa aérea total, viva y muerta, carbono almacenado y CO<sub>2</sub> absorbido en la Reserva Kaxil-Kiuic.

Se obtuvieron valores promedio de  $115.21 \pm 5.43$  ton ha<sup>-1</sup> para la biomasa aérea total;  $106.28 \pm 5.10$  ton ha<sup>-1</sup> para la biomasa aérea viva y  $8.93 \pm 0.65$  ton ha<sup>-1</sup> para la biomasa aérea muerta. La variación de las mismas fue de 1.87 ton ha<sup>-1</sup> a 314.84 ton ha<sup>-1</sup> para sitios de 3 a 100 años para biomasa aérea total; 1.26 ton ha<sup>-1</sup> a 305.92 ton ha<sup>-1</sup> para sitios de 4 a 100 años para biomasa aérea viva y 0.16 ton ha<sup>-1</sup> a 35.15 ton ha<sup>-1</sup> para sitios de 4 a 65 años para biomasa aérea muerta.

Tomando en cuenta la estimación promedio de la biomasa aérea (total, viva y muerta), el factor de carbono de 0.5 y la relación de 3.67 (peso molecular del CO<sub>2</sub> dividido el peso molecular del C); la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic tiene almacenado  $57.60 \pm 2.71$  ton C ha<sup>-1</sup>,  $53.14 \pm 2.55$  ton C ha<sup>-1</sup> y  $4.47 \pm 0.33$  ton C ha<sup>-1</sup> y su equivalente a  $211.41 \pm 4.98$  ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>,  $195.02 \pm 4.68$  ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> y  $16.39 \pm 0.60$  ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Tabla 2).

**Tabla 2.** Valores estimados de biomasa aérea total, viva y muerta, carbono almacenado y su equivalente en CO<sub>2</sub> en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.

<b>Parámetro</b>	<b>Total (ton ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Viva (ton ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Muerta (ton ha<sup>-1</sup>)</b>
Biomasa	115.21±5.43	106.28±5.10	8.93±0.65
Carbono	57.60±2.71	53.14±2.55	4.47±0.33
CO <sub>2</sub>	211.41±4.98	195.02±4.68	16.39±0.60

Un estudio realizado por Uicab [80] en la misma región del presente estudio, reporta un valor de biomasa aérea total promedio en el ecosistema de 44.58 Mg ha<sup>-1</sup> y que varió de 0.0027 Mg ha<sup>-1</sup> en sitios de 3 años hasta 232 Mg ha<sup>-1</sup> en sitios de 60 años de edad de abandono. Este resultado es mucho menor comparado con el valor promedio (111.99 ton ha<sup>-1</sup>) y del rango de edades en sitios de 3 hasta 60 años de edad (1.87 hasta 282.77 ton ha<sup>-1</sup>, respectivamente) obtenido en este trabajo. Esto puede ser atribuido a que en el estudio reportado por este autor no se estimó la biomasa de arbustos, palmeras ni de lianas por falta de ecuaciones alométricas para estas formas de vida, mientras que, para el presente trabajo si se estimó la biomasa para estos componentes. Otro estudio realizado por Dai *et al.* [128] en la misma región, reporta una variación de 5 a 115 Mg C ha<sup>-1</sup> en el carbono aéreo con un valor promedio de 56.6 Mg C ha<sup>-1</sup> en 276 parcelas en un bosque secundario tropical seco al sur de la península de Yucatán. Estos valores son relativamente menores y están dentro del rango obtenido para este estudio (0.93 a 157.42 ton C ha<sup>-1</sup>), mientras que, el valor promedio obtenido en el estudio anterior es similar al de este trabajo (57.61 ton C ha<sup>-1</sup>).

Jaramillo [129] reporta para la región de Chamela cerca de la costa del Pacífico de Jalisco, México, para bosques tropicales secos valores promedio de biomasa aérea de 112.23±9.62 Mg ha<sup>-1</sup>. Si se compara el valor promedio obtenido en el estudio actual (115.22 ton ha<sup>-1</sup>) se puede observar que son resultados similares. Eaton *et al.* [130] para tres ejidos al sureste de México y específicamente para un área de montañas reporta para la biomasa aérea valores de carbono entre 57.3 a 68.1 Mg de C ha<sup>-1</sup>, resultados similares comparados con los obtenidos en este estudio 57.61 ton de C ha<sup>-1</sup>. El autor menciona que las zonas de montañas son áreas de bosque maduro que probablemente fueron perturbados por tala selectiva entre 1930 y 1960.

Cabe destacar que en el presente estudio solo se estimó la biomasa aérea total acumulada, como se reporta en la mayoría de otros estudios [131], [132], por lo que no se contempla la biomasa subterránea [133], [6], ni de la materia orgánica muerta [134], por lo tanto, para la presente investigación se sub-estima la cantidad de biomasa y el carbono almacenados en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic al no considerar la biomasa subterránea y la materia orgánica muerta.

### **3.2 Comportamiento de la biomasa aérea en función de la edad de sucesión y la condición topográfica.**

La edad de sucesión y la condición topográfica se relacionaron significativamente con la biomasa aérea (total, viva y muerta) ( $R^2=0.61$ ,  $P<0.05$ ;  $R^2=0.604$ ,  $P<0.05$ ,  $R^2=0.26$ ,  $P<0.05$ ). La biomasa aérea aumenta con el tiempo de abandono de la vegetación y presenta los máximos valores en pendientes intermedias.

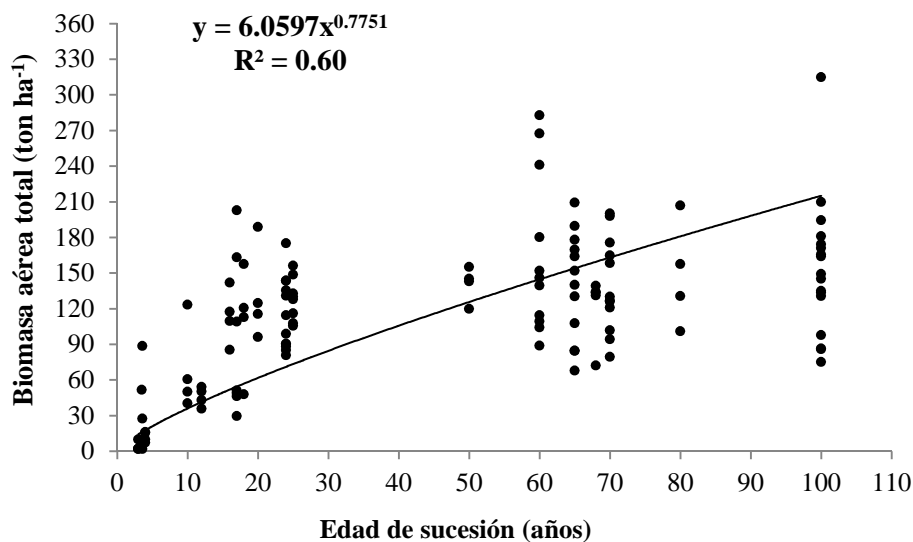
Los componentes de la edad de sucesión y la condición topográfica explicaron de manera conjunta el 61, 60 y 26% de la variación de la biomasa aérea total, viva y muerta en la reserva Kaxil-Kiuic, siendo la edad de sucesión el componente que mayor variación explicó con un 38, 37 y 25% respectivamente. La condición topográfica sólo explicó el 1% de la variación para la biomasa aérea total y muerta, mientras que para la biomasa aérea viva no hubo explicación.

Clark *et al.* [135] compararon la estructura de la selva tropical en un gradiente altitudinal en Costa Rica, y reportan que la biomasa aérea de la selva aumenta con la edad y la elevación de las diferentes parcelas establecidas. V. de Castilho *et al.* [136] en una Reserva Forestal en las Amazonas, Brasil, reporta que las estimaciones de biomasa más alta se encontraron en parcelas de mayor edad y que se localizan generalmente en mayor elevación, y específicamente los efectos de la topografía se ven más reflejados en aquellos individuos que presentan diámetros entre 1 y 10 cm.

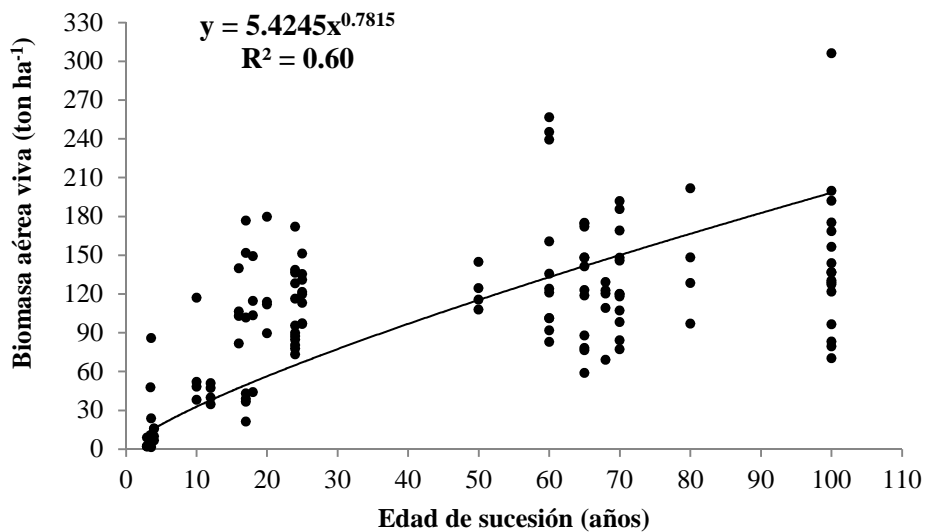
### **3.3 Comportamiento de la biomasa aérea en relación con la edad de sucesión.**

La edad de sucesión se relacionó positivamente con la biomasa aérea total y viva (Figura 7 y 8) ( $R^2=0.60$ ,  $P<0.05$ ;  $R^2=0.60$ ,  $P<0.05$ ) mientras que la biomasa aérea muerta tuvo un

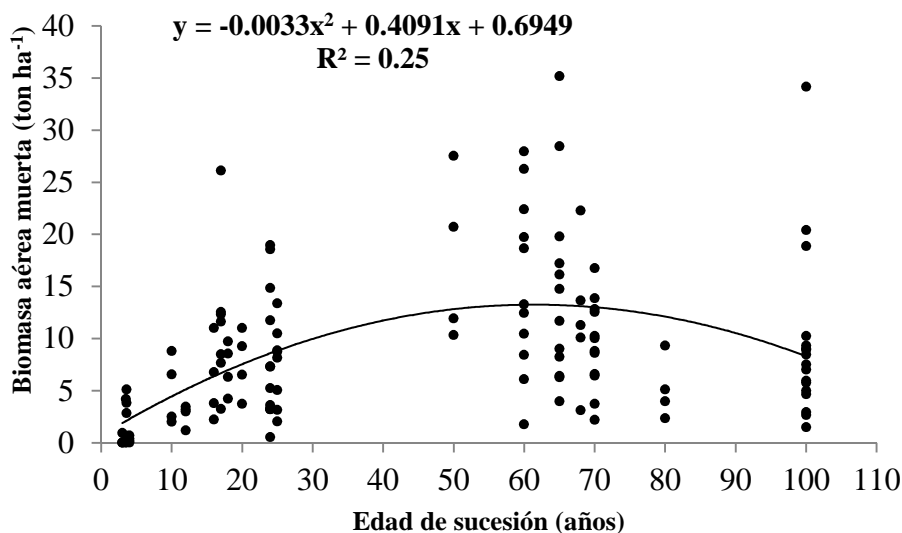
comportamiento un poco diferente (figura 9) ( $R^2=0.25$ ,  $P<0.05$ ) encontrándose mayor acumulación en edades intermedias.



**Figura 7.** Biomasa aérea total  $\text{ton ha}^{-1}$  (DN 2 cm) en parcelas de  $400 \text{ m}^2$  de diferentes edades de abandono en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuc.



**Figura 8.** Biomasa aérea viva  $\text{ton ha}^{-1}$  (DN 2cm) en parcelas de  $400 \text{ m}^2$  de diferentes edades de abandono en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuc.



**Figura 9.** Biomasa aérea muerta  $\text{ton ha}^{-1}$  (DN 2 cm) en parcelas de  $400 \text{ m}^2$  de diferentes edades de abandono en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.

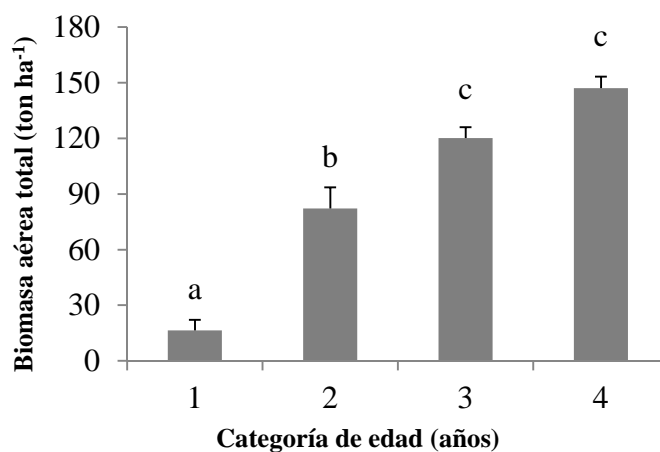
En general la biomasa aérea en función de la edad de sucesión tuvo un comportamiento positivo, es decir que a medida que incrementa la edad de sucesión o periodo de abandono también incrementa la biomasa. Este incremento fue potencial, lo que indica un aumento pronunciado de la biomasa aérea en las edades tempranas de abandono, seguido de un aumento menos pronunciado en las edades avanzadas [134], lo cual concuerda con la hipótesis 1. Este comportamiento en la biomasa aérea puede deberse a los patrones de reclutamiento, crecimiento y mortalidad de individuos. En las edades tempranas después del abandono del sitio, las especies pioneras se establecen rápidamente por el espacio disponible, posteriormente cuando las condiciones ecológicas no son aptas para éstas, mueren y comienza la dominancia de especies de crecimiento lento obteniéndose un crecimiento lento y menor en la biomasa acumulada [137], [89], [105, 114], [105]. De igual manera, en las primeras etapas de la sucesión hay dominancia de individuos de edades similares, y están en rápido crecimiento, mientras que, en edades más avanzadas existe una variedad de individuos de diferentes edades, mismos que pueden estar en crecimiento rápido, lento o nulo [80].

Dupuy *et al.* [89] en un estudio realizado en esta misma región encontraron que la edad de sucesión entre otros factores (configuración del paisaje y estructura espacial) explicó el 68% de la variación de la biomasa aérea, valor similar al obtenido en nuestro estudio (60%). Asimismo Uicab [80] también reporta para la misma región, que el 56% de la variación total de la biomasa aérea para individuos con  $DN > 1\text{cm}$  fue explicado por la edad de sucesión.

En relación con el comportamiento de la biomasa muerta, Jaramillo [129] realizó un estudio para bosques secos en la región de Chamela cerca de la costa del Pacífico de Jalisco, México, donde reporta que la variación de la biomasa de madera muerta (árboles en pie y caídos) explicada por la edad de sucesión fue ligeramente mayor (27 a 29%) a la obtenida en el estudio actual (25%). Estas diferencias pueden deberse en parte a que en nuestro caso solo estimamos la biomasa aérea muerta pero para árboles en pie, sin considerar el mantillo ni el material leñoso caído.

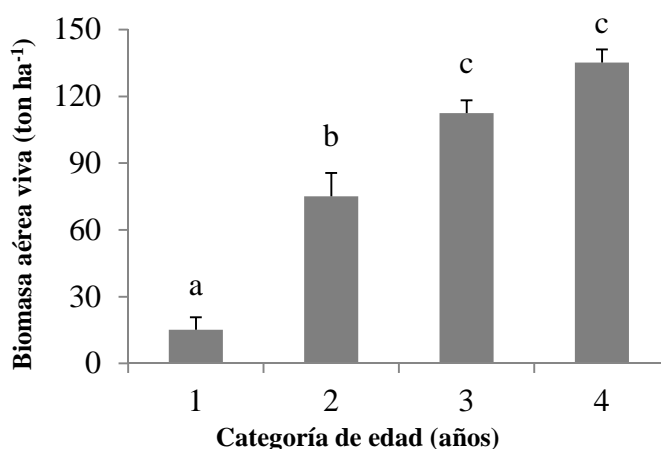
### 3.4 Comportamiento de la biomasa aérea en relación con las diferentes categorías de edad.

La biomasa aérea total varió significativamente entre categorías de edad de sucesión ( $F=42.726$ ;  $P<0.05$ ) en particular la biomasa aérea fue mayor en las categorías de edad 3 y 4 que en la 2 y mayor en esta que en la 1 (Figura 10). La mayor cantidad de biomasa aérea total se reporta para las categorías 3 y 4 con un promedio de  $120.16 \pm 5.79 \text{ ton ha}^{-1}$  y  $147.05 \pm 6.17 \text{ ton ha}^{-1}$ , respectivamente.



**Figura 10.** Biomasa aérea total por categoría de edad en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de edad ( $\alpha=0.05$ , Tukey): 1: 3-5; 2: 10-17; 3: 18-25; 4>25 años.

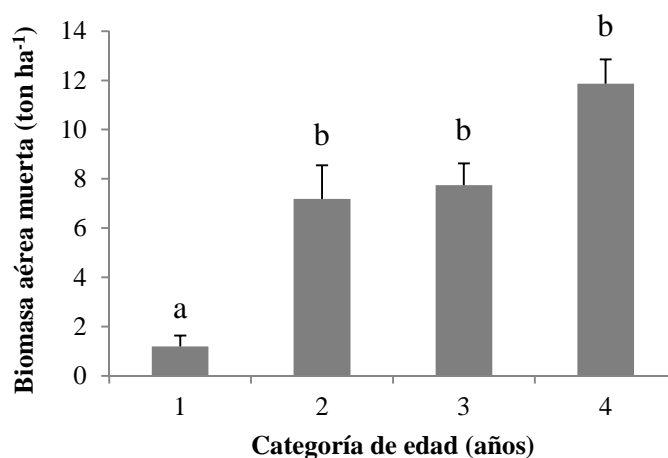
La biomasa aérea viva también varió significativamente entre categorías de edad de sucesión ( $F=39.366$ ;  $P<0.05$ ) y mostró un patrón muy parecido al de la biomasa aérea total (Figura 11). La mayor cantidad de biomasa aérea viva se reporta para las categorías 3 y 4 con un promedio de  $112.42\pm 5.77$  ton  $ha^{-1}$  y  $135.19\pm 5.93$  ton  $ha^{-1}$  respectivamente.



**Figura 11.** Biomasa viva por categoría de edad en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de edad ( $\alpha=0.05$ , Tukey). 1: 3-5; 2: 10-17; 3: 18-25; 4>25 años.

La biomasa aérea muerta mostró un patrón un poco diferente, siendo menor en la categoría de edad 1, comparada con las otras categorías, que no difirieron entre sí ( $F=12.515$ ;  $P<0.05$ ) (Figura 12). La mayor cantidad de biomasa muerta se encuentra en las categorías de edad 2, 3 y 4 con un promedio de  $7.18\pm 1.36$  ton  $ha^{-1}$ ,  $7.14\pm 0.89$  ton  $ha^{-1}$  y  $11.86\pm 0.99$  ton  $ha^{-1}$ , respectivamente. Chazdon [102] menciona las fases de sucesión en bosques tropicales y específicamente en la segunda fase llamada la exclusión de tallos que se caracteriza por el cierre del dosel dando como resultado una alta mortalidad de liana, arbustos, arboles pioneros de corta vida que son intolerables a la sombra, este proceso también es conocido como auto-aclareo. Estos resultados son congruentes con este modelo

general (bosque tropical entre los 10-25 años), pero sugieren que las etapas de sucesión posteriores mantienen valores altos de biomasa muerta, posiblemente debido a la mortalidad de individuos de gran edad y tamaño.



**Figura 12.** Biomasa aérea muerta por categoría de edad en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de edad ( $\alpha=0.05$ , Tukey): 1: 3-5; 2: 10-17; 3: 18-25; 4>25 años.

Puc-Kauic [103] reporta valores promedio de biomasa y carbono aéreo en bosques tropicales secundarios del sur de Quintana Roo, incluyendo árboles adultos y juveniles, lianas y palmeras de 39.75 Mg ha<sup>-1</sup> ( $\pm 12.0$ ) en rodales de 7 años de abandono, 175.35 ( $\pm 31.0$ ) Mg ha<sup>-1</sup> en rodales de 46 años de abandono y 236.20 $\pm 21.4$  Mg ha<sup>-1</sup> en rodales de 35 años, así como valores promedio de 19.87 ( $\pm 6.0$ ) Mg de C ha<sup>-1</sup> para los rodales de 7 años a 89.57 ( $\pm 3.5$ ) Mg de C ha<sup>-1</sup> del rodal maduro siendo el rodal de 35 años el que presentó las reservas de Carbono más altas con valores de 118.10 ( $\pm 6.3$ ) Mg de C ha<sup>-1</sup> a través de la sucesión secundaria. Estos resultados son mayores comparados con los valores de biomasa y carbono aéreo obtenidos en la Reserva Kaxil-Kiuic, para rangos de edades entre 4 a 10 y 25 a 50 años de edad, siendo la biomasa aérea total de 32.56 y 85.80 ton ha<sup>-1</sup> así como 16.28 y 42.90 ton de C ha<sup>-1</sup> respectivamente. Las diferencias entre resultados puede deberse



a que en Quintana Roo se reportan especies como *Manilkara sapota* (L.) P. Royen, *Brosimum alicastrum* Sw, *Metopium brownei* (Jacq.) Urb. [138], las cuales son muy abundantes y dominantes a partir de edades tempranas y alcanzan grandes tamaños, incrementando los valores de biomasa y carbono aéreo de ese sitio de estudio.

Quesada [139] reporta para bosques tropicales secos mayores a los 20 años en Costa Rica valores de biomasa aérea de 79.58 ton ha<sup>-1</sup> mucho menores comparados con la biomasa aérea total (115.21 ton ha<sup>-1</sup>) obtenida en sitios mayores a los 20 años en nuestro estudio. Esto puede deberse en parte al relativamente alto nivel de intervención e impacto de actividades humanas reportados por el autor, comparados con la reserva Kaxil-Kiuic la cual se encuentra en un área de conservación, lo que contribuye a mantener valores mayores de biomasa.

Urquiza *et al.* [87] realizó estudios en los estados de Quintana Roo y Yucatán en los que reportan valores de biomasa aérea estimada que oscilan entre 28.8±3.8 Mg ha<sup>-1</sup> en parcelas de edad de 10 a 15 años a 191.9±9.5 mg ha<sup>-1</sup> en parcelas de bosque maduro inalteradas (>50 años). Los resultados obtenidos en el estudio actual para edades entre los 10 y 16 años de abandono son mayor (67.96 ton ha<sup>-1</sup>) que los reportados en el estudio anterior, mientras que los resultados para sitios con edades mayores a los 50 años (144.18 ton ha<sup>-1</sup>) son menores en comparación con el estudio anterior. Esto sugiere que el sitio de estudio recupera su biomasa aérea más rápidamente, pero alcanza valores menores que el sitio del estudio anterior. Esto puede deberse a que los sitios de Quintana Roo están relacionados con un gradiente de perturbación producto de las actividades humanas como la tala, la explotación forestal y los incendios, lo cual podría llevar a una recuperación más lenta de la biomasa en sitios con edades jóvenes. Por otro lado los sitios mayores a los 50 años corresponden a un bosque maduro e inalterado, además, abarca bosque tanto de Yucatán como Quintana Roo, y, específicamente para este último se ha reportado que hay varias especies que presentan dominancia y crecimiento (altura y diámetro) mucho mayor, lo que hace que la biomasa en esa zona sea mayor que en la del área de este estudio.

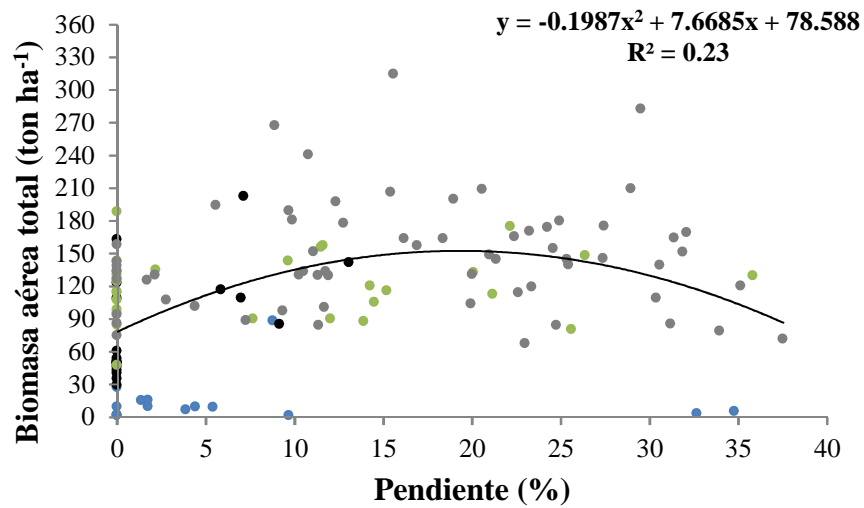
Uicab [80] reporta para la misma región del presente estudio el comportamiento de la biomasa aérea por categoría de edad, donde los mayores valores de biomasa se encuentran en sitios con edades mayores a los 15 años (categoría de edad 3). Estos resultados son similares a los del presente estudio en el que la mayor cantidad de la biomasa área almacenada se encuentra en sitios con edades mayores a los 18 años (categoría 3).

Yepes *et al.* [140] en un estudio en la región de Porce, Antioquia, Colombia, reporta que hay diferencias significativas en cuanto a la biomasa aérea total al comparar bosques con edades entre 7-11 años, 20-25, 40-43 y bosque primario, presentando mayor acumulación de biomasa aérea total a partir de bosques entre los 20 a 25 años. Estos resultados son similares con el estudio actual encontrándose diferencia significativa por categoría de edad y específicamente la mayor acumulación de biomasa aérea total a partir de los sitios con edades mayores a los 18 años.

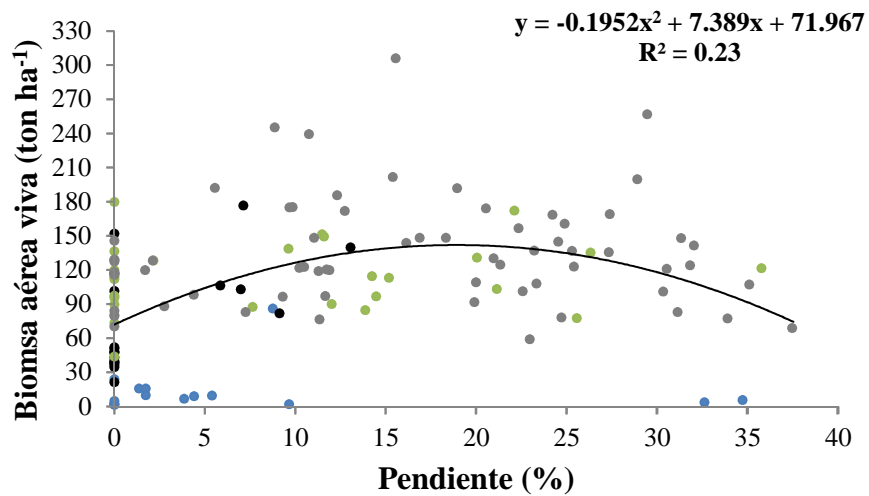
Eaton *et al.* [130] y Read *et al.* [141] en el sur de la Península de Yucatán reportan que los bosques secundarios requieren entre 40 a 60 años y un máximo de 95 años para alcanzar los niveles de biomasa de rodales maduros. Puc-Kauic [103] para el sur de Quintana Roo reporta que los bosques secundarios requieren de entre 30 a 50 años para recuperar la biomasa y que pueda ser comparable a la obtenida en rodales maduros. Al comparar estos datos con los nuestros se puede observar que la cantidad de biomasa aérea en nuestro estudio se comienza a recuperar a partir de los 18 años lo que indica que las selvas de Kaxil-Kiuic podrían ser muy resilientes. Esto quiere decir que la velocidad con que se recupera la biomasa aérea en esta zona de estudio es muy elevada a tal grado que puede alcanzar valores de biomasa aérea similares a los de las selvas mayores a los 60 años.

### **3.5 Comportamiento de la biomasa aérea en relación con la pendiente.**

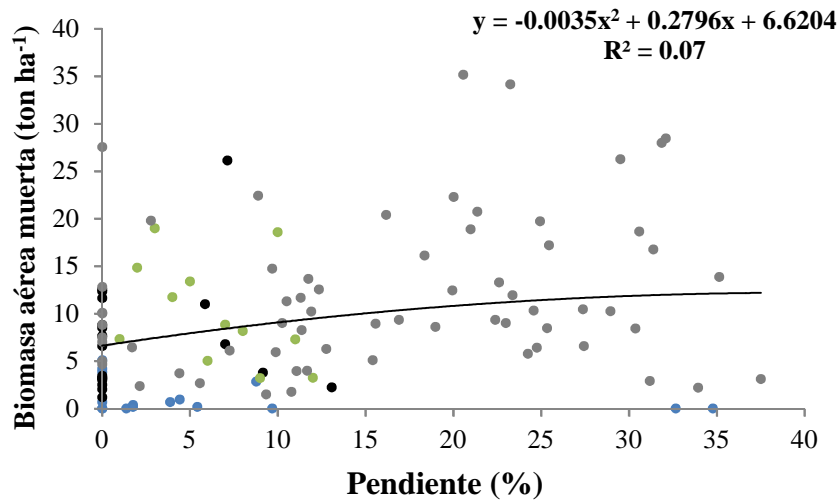
La biomasa aérea total, viva y muerta presentó un comportamiento diferente en relación con la pendiente ( $R^2=0.23$ ,  $P<0.05$ ;  $R^2=0.23$ ,  $P<0.05$ ;  $R^2=0.07$ ,  $P<0.05$ ) encontrándose la mayor acumulación de biomasa aérea en pendientes intermedias (Figuras 13, 14 y 15).



**Figura 13.** Biomasa aérea total ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) para individuos con DN 2 cm en parcelas de  $400 \text{ m}^2$  en función de la pendiente en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuc.



**Figura 14.** Biomasa aérea viva ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) para individuos con DN 2 cm en parcelas de  $400 \text{ m}^2$  en función de la pendiente en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuc.



**Figura 15.** Biomasa aérea muerta ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) para individuos con DN 2.5 cm en parcelas de  $400 \text{ m}^2$  en función de la pendiente en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.

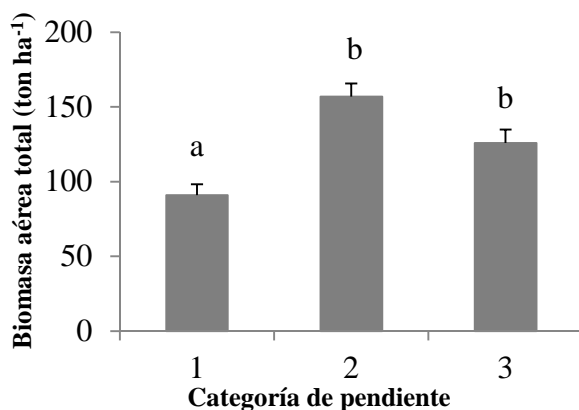
Estos resultados difieren un poco de lo planteado en la hipótesis 2, dado que se esperaba que los sitios en zonas planas tuvieran mayor biomasa que los de cerro. Varios estudios reportan que la posición topográfica afecta la profundidad, pedregosidad, materia orgánica, nutrientes y la disponibilidad de agua en el suelo e influye por lo tanto en la estructura del bosque y la composición de especies [142], [143], [89] y [107]. Esto puede deberse a que la topografía controla la distribución de agua y la redistribución de sedimentos y solutos sobre el terreno y por consiguiente tiene efectos pronunciados sobre el microclima [144]. En la parte baja y media de la pendiente los suelos adquieren materiales y agua de la parte más alta, los cuales son suministrado mediante la escorrentía superficial o escorrentía lateral [145].

Resultados similares son reportados por V. de Castilho *et al.* [136] en una Reserva Forestal en la Amazonia, Brasil, donde la topografía explicó el 21% de la variación en las estimaciones de biomasa aérea y la mayor cantidad se encuentra en pendientes intermedias, siendo el rango de pendiente para ese estudio de 0.87 a 50.95%, valores que son relativamente similares a los nuestros con un 23% de variación de la biomasa aérea explicado por la pendiente y un rango de 1.37 a 38%. Los autores mencionan que las

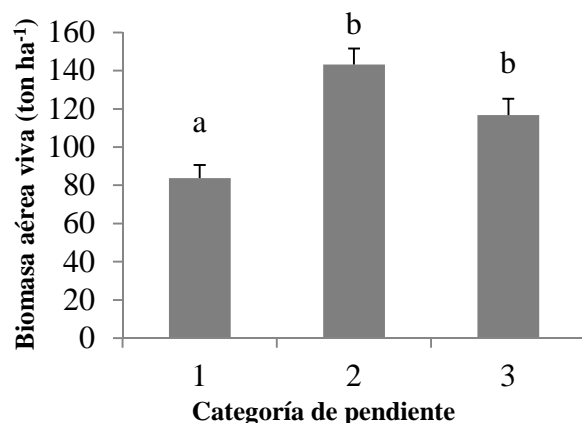
características del suelo y la topografía podrían afectar indirectamente a la biomasa aérea a través de cambios en la composición de especies, la dinámica y las limitaciones fisiológicas. Según ese estudio, la biomasa aérea se relaciona positivamente con la textura del suelo que puede estar relacionada con la humedad, la disponibilidad de nutrimentos y el ciclo de estos, indicando que hay un mayor contenido de sustratos con arcilla en zonas donde se encuentra mayor biomasa.

### 3.6 Comportamiento de la biomasa aérea en relación con las diferentes categorías de pendientes.

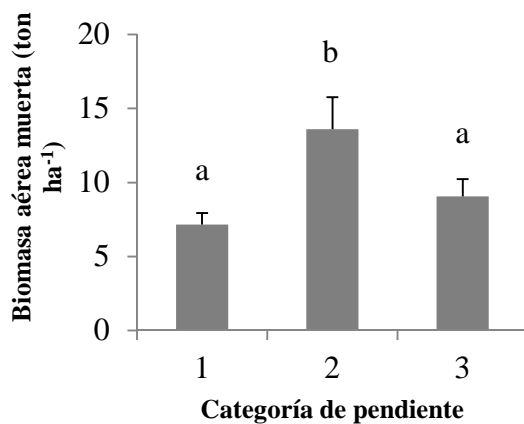
La biomasa aérea total, viva y muerta varió significativamente entre categorías de pendiente ( $F=14.130$ ,  $P<0.05$ ;  $F=13.229$ ,  $P<0.05$ ;  $F=6.881$ ,  $P<0.05$ ) (Figuras 16, 17 y 18), siendo mayor para las categoría 2 y 3 y menor para la 1 para la biomasa aérea total y viva, mientras que para la biomasa aérea muerta fue mayor en la categoría 2 y menor para la 1 y 3. La categoría de pendiente que mayor promedio de biomasa aérea presentó fue la 2 con  $156.78\pm 8.96$   $\text{ton ha}^{-1}$  de biomasa total,  $143.167\pm 8.36$   $\text{ton ha}^{-1}$  de biomasa viva y  $13.612\pm 2.16$   $\text{ton ha}^{-1}$  de biomasa muerta.



**Figura 16.** Biomasa aérea total por categoría de condición topográfica en la Reserva Kaxil-Kiuc. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de condición topográfica ( $\alpha=0.05$ , Tukey). 1: sitios planos con pendientes menores al 10%; 2: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% con exposición norte; 3: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición sur.



**Figura 17.** Biomasa aérea viva por categoría de pendiente en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de condición topográfica ( $\alpha=0.05$ , Tukey). 1: sitios planos con pendientes menores al 10%; 2: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición norte; 3: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición sur.



**Figura 18.** Biomasa aérea muerta por categoría de pendiente en la Reserva Kaxil-Kiuic. Las barras muestran el promedio  $\pm$  error estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre categorías de condición topográfica ( $\alpha=0.05$ , Tukey). 1: sitios planos con pendientes menores al 10%; 2: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición norte; 3: sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y exposición sur.

En síntesis al analizar la biomasa aérea en relación con las categorías de pendiente, la mayor cantidad de biomasa aérea se encuentra en sitios que están ubicados en cerros específicamente en pendientes intermedias. Este resultado no concuerda con la hipótesis 2 y se puede atribuir a que el área de estudio ha tenido una larga historia de asentamientos mayas cuya principal actividad ha sido la agricultura de roza tumba y quema para la siembra de maíz, frijol y calabaza, seleccionando aquellos sitios más planos debido a la mayor disponibilidad de agua, profundidad del suelo, fácil acceso para la realización de actividades, entre otras características [107]. Esto podría haber permitido que se encuentren individuos de mayor edad y tamaño en zonas de pendientes y que por lo tanto también se encuentre mayor biomasa, comparado con zonas planas. Argumentos similares son reportados en un estudio realizado por Dupuy *et al.* [95] sobre el efecto del cambio de uso de suelo en la biomasa y diversidad de plantas leñosas en un bosque tropical seco de Yucatán donde reportan que la aptitud para usos agrícolas y los cambios de uso de la tierra deberían ser mayores en zonas planas y menores en cerros para esta región.

Además, cabe mencionar que los sitios ubicados en cerros se caracterizan por la fuerte presencia de rocas dando como resultado suelos poco profundos, lo que hace que la estructura y composición de especies varíen con la topografía [107].

Hernández-Stefanoni *et al.* [114] reportan para la misma área de este estudio que la biomasa aérea fue mayor en bosques secundarios >15 años en sitios planos que en bosques secundarios >15 años en cerros, lo cual es opuesto a lo reportado en este estudio. Esto puede deberse a que la mayoría de los sitios que se encuentran en cerros en el estudio anterior se encontraban ubicados en las cimas de los cerros y no específicamente en las laderas. De igual manera Clark *et al.* [146] mencionan que la biomasa fue mayor en zonas de pendientes en relación con zonas planas en bosques maduros en la estación biológica La Selva, en tierra bajas del Atlántico de Costa Rica. En ese estudio se menciona que los árboles de mayor tamaño se encontraron en terrazas aluviales.

No se encontró una diferencia significativa en cuanto a la biomasa aérea total y viva entre sitios con exposición norte y sur, pero si para la biomasa muerta, la cual fue menor en sitios que se encuentran en cerros con pendientes mayores o iguales al 10% y exposición norte.

Esto puede ser atribuido a que existe menor radiación solar en estos sitios en comparación con los sitios en cerros y con exposición sur, lo que haría que la retención de agua en los primeros sea mayor propiciando una menor mortalidad (asumiendo que el déficit hídrico es el principal factor de mortalidad en este tipo de selvas), así como una tasa de descomposición mayor, y por lo tanto una menor acumulación de biomasa aérea muerta.

### 3.7 Especies que más contribuyeron a la biomasa aérea en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.

De 160 especies identificadas en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic el 80% de la biomasa aérea total está representada por 13 especies (Tabla 3), siendo la especie *Bursera simaruba* la que mayor biomasa contribuyó, con 20.07 ton ha<sup>-1</sup> lo que representa un 20.35%, seguido por *Lysiloma latisiliquum* con 15.38 ton ha<sup>-1</sup> que representa el 15.60%, *Caesalpinia gaumeri* con 13.15 ton ha<sup>-1</sup> lo que representa un 13,34%, *Piscidia piscipula* con 7.45 ton ha<sup>-1</sup> lo que representa 7.56%, entre otras.

**Tabla 3.** Especies que contribuyen con el 80% de la biomasa total estimada en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.

NC_CRONQUIS	Familia	Biomasa total ton/ha	80% biomasa total	% biomasa total por sp
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Burseraceae	20.07	20.35	20.35
<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	Fabaceae	15.38	35.95	15.60
<i>Caesalpinia gaumeri</i> Greenm.	Fabaceae	13.15	49.29	13.34
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	Fabaceae	7.45	56.84	7.56
<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.	Verbenaceae	5.28	62.20	5.35
<i>Thouinia paucidentata</i> Radlk.	Sapindaceae	4.12	66.38	4.18
<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundell.	Fabaceae	2.76	69.18	2.80
<i>Acacia gaumeri</i> S. F. Blake.	Fabaceae	2.49	71.71	2.53
<i>Gymnopodium floribundum</i> Rolfe.	Polygonaceae	2.30	74.05	2.34
<i>Coccoloba spicata</i> Lundell.	Polygonaceae	2.15	76.23	2.18
<i>Erythroxylum rotundifolium</i> Lunan.	Erythroxylaceae	1.87	78.13	1.90
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	Bixaceae	1.27	79.43	1.29
<i>Platymiscium yucatanum</i> Standley.	Fabaceae	1.11	80.56	1.13



Estudios como el de Hernández-Stefanoni [138] y Uicab [80] reportan para la misma zona que las especies que más contribuyen a la biomasa y carbono aéreo así como a la abundancia están *Gymnopodium floribundum*, *Bursera simaruba*, *Piscidia piscipula*, *Lysiloma latisiliquum* y *Caesalpinia gaumeri*.

Las categorías de edad de sucesión con mayor aporte de biomasa aérea fueron la 3 y 4; en la categoría de edad 3 el 80% de la biomasa aérea total, estuvo representada por las siguientes especies *Bursera simaruba* con 5.09 ton ha<sup>-1</sup> lo que representa el 23.22%, *Lysiloma latisiliquum* con 4.93 ton ha<sup>-1</sup> que representa el 22.51%, *Caesalpinia gaumeri* con 1.72 ton ha<sup>-1</sup> lo que representa 7.89% entre otras (Tabla 4).

**Tabla 4.** Especies que aportaron mayor biomasa (80%) en la categoría de edad 3 (CE3).

NC_CRONQUIS	Familia	Biomasa total ton/ha CE3	80% Biomasa total	% Biomasa total por sp
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Burseraceae	5.09	23.22	23.22
<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	Fabaceae	4.93	45.73	22.51
<i>Caesalpinia gaumeri</i> Greenm.	Fabaceae	1.72	53.62	7.89
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	Fabaceae	1.63	61.07	7.45
<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.	Verbenaceae	1.30	67.04	5.97
<i>Coccoloba spicata</i> Lundell.	Polygonaceae	0.58	69.72	2.68
<i>Thouinia paucidentata</i> Radlk.	Sapindaceae	0.54	72.21	2.50
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	Fabaceae	0.54	74.69	2.48
<i>Acacia gaumeri</i> S. F. Blake.	Fabaceae	0.40	76.53	1.84
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	Bixaceae	0.35	78.13	1.60
<i>Erythroxylum rotundifolium</i> Lunan.	Erythroxylaceae	0.27	79.38	1.25
<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundell.	Fabaceae	0.24	80.50	1.12

Las principales especies que aportaron el 80% de la biomasa aérea total en la categoría de edad 4 (CE4) fueron: *Bursera simaruba* con 13.01 ton ha<sup>-1</sup> lo que representa el 19.53%, *Caesalpinia gaumeri* con 10.80 ton ha<sup>-1</sup> lo que representa 16.21%, *Lysiloma latisiliquum* con 9.27 ton ha<sup>-1</sup> que representa el 13.92 %, entre otras (Tabla 5).

**Tabla 5.** Especies que aportaron mayor biomasa (80%) en la categoría de edad 4 (CE4).

NC_CRONQUIS	Familia	Biomasa total ton/ha CE4	80% biomasa total	% biomasa total por sp
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Burseraceae	13.01	19.53	19.53
<i>Caesalpinia gaumeri</i> Greenm.	Fabaceae	10.80	35.74	16.21
<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	Fabaceae	9.27	49.66	13.92
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	Fabaceae	4.36	56.21	6.55
<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.	Verbenaceae	3.71	61.78	5.57
<i>Thouinia paucidentata</i> Radlk.	Sapindaceae	3.14	66.50	4.71
<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundell.	Fabaceae	1.98	69.48	2.98
<i>Acacia gaumeri</i> S. F. Blake.	Fabaceae	1.92	72.37	2.89
<i>Gymnopodium floribundum</i> Rolfe.	Polygonaceae	1.78	75.05	2.67
<i>Erythroxylum rotundifolium</i> Lunan.	Erythroxylaceae	1.32	77.04	2.00
<i>Platymiscium yucatanum</i> Standley.	Fabaceae	1.09	78.68	1.64
<i>Coccoloba spicata</i> Lundell.	Polygonaceae	1.08	80.30	1.63

Al igual que las especies que contribuyeron al 80% de la biomasa aérea total en la Reserva, las especies que aportan la mayor cantidad de biomasa (80%) en las categorías de edades 3 y 4 entre otras son *Bursera simaruba* de la familia Burseraceae, *Lysiloma latisiliquum*, *Caesalpinia gaumeri* y *Piscidia piscipula* de la familia Fabaceae. Esto indica que son las especies de mayor importancia para el almacenamiento de biomasa y carbono aéreo en la Reserva Kaxil-Kiuic.

En cuanto a las categorías de pendiente, la que mayor biomasa total aportó fue la categoría de pendiente 2, la cual correspondió a sitios en cerros con pendientes mayor o igual al 10% y con exposición norte: las especies que contribuyeron al 80% de esta biomasa fueron *Lysiloma latisiliquum* con 4.987 ton ha<sup>-1</sup> que representa el 20.18%, *Bursera simaruba* con 4.794 ton ha<sup>-1</sup> representando el 19.40%, *Caesalpinia gaumeri* con 2.506 ton ha<sup>-1</sup> lo que representa el 10.14% entre otras (Tabla 6).

**Tabla 6.** Especies que aportaron el 80% de la biomasa total en la categoría de pendiente 2 (CP2).

NC_CRONQUIS	Familia	Biomasa total	80% biomasa	% biomasa total
		ton/ha CP2	total	por sp
<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	Fabaceae	4.98	20.19	20.19
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Burseraceae	4.79	39.59	19.41
<i>Caesalpinia gaumeri</i> Greenm.	Fabaceae	2.50	49.74	10.15
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	Fabaceae	1.53	55.94	6.20
<i>Thouinia paucidentata</i> Radlk.	Sapindaceae	1.28	61.16	5.22
<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundell.	Fabaceae	1.18	65.97	4.80
<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.	Verbenaceae	0.87	69.49	3.52
<i>Acacia gaumeri</i> S. F. Blake.	Fabaceae	0.74	72.50	3.01
<i>Gymnopodium floribundum</i> Rolfe.	Polygonaceae	0.65	75.16	2.66
<i>Platymiscium yucatanum</i> Standley.	Fabaceae	0.62	77.67	2.51
<i>Coccoloba spicata</i> Lundell.	Polygonaceae	0.60	80.11	2.44

En síntesis, al identificar las especies que contribuyeron al 80% de la biomasa aérea total, así como en las categorías de edad 3 y 4 y la categoría de pendiente 2 en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic; se puede concluir que *Bursera simaruba* de la familia Burseraceae, *Lysiloma latisiliquum*, *Caesalpinia gaumeri* y *Piscidia piscipula* de la familia Fabaceae son las especies que ocupan los primeros lugares en cada una de las diferentes condiciones analizadas, por lo que son las especies más importantes en la Reserva para el almacenamiento de biomasa y carbono aéreo.

Considerando la importancia del componente biomasa y carbono aéreo total, y en algunos casos la densidad específica de la madera (ANEXO C tabla 3) de algunas especies, se puede considerar que éstas podrían ser materia prima potencial para bioenergía específicamente para el proceso de cogeneración, producción de pellets, carbón, etc., así como para la obtención potencial de biocombustibles lignocelulósicos. Estas mismas especies, entre otras, son reportadas en un estudio realizado por Quiroz Carranza *et al.* [147] sobre el uso y manejo de leña para combustible en viviendas de seis localidades de Yucatán, en el que se menciona la identificación de 41 especies más usadas como

combustible, y entre las principales están: *Acacia gaumeri* S. F. Blake, *Havardia albicans* (Kunth) Britton & Rose, *Lysiloma latisiliquum*, *Gymnopodium floribundum*, *Bursera simaruba*, *Caesalpinia gaumeri*, *Conocarpus erectus* L y *Piscidia piscipula*. Una de las principales características por la que son seleccionadas es su gran abundancia, inflamabilidad y larga duración de combustión, así como por su baja emisión de humo.

## CONCLUSIONES

La estimación de la biomasa y el carbono aéreo es un componente importante para establecer los presupuestos locales y globales de carbono, indispensables para implementar estrategias de mitigación del cambio climático; además, son elementos importantes para conocer, analizar y comparar la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los ecosistemas forestales, así como para implementar estrategias de manejo sostenible de los mismos.

La cantidad de biomasa aérea promedio que se estimó en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic fue de 115.21 ton ha<sup>-1</sup> lo que corresponde a 57.60 ton de C ha<sup>-1</sup> y a 211.41 ton de CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>. Tomando en cuenta que la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic está conformada por una área de 1,800 ha aproximadamente, se puede concluir que la Reserva posee una cantidad de biomasa aérea almacenada de aproximadamente 207,378 ton, lo que corresponde a un total de carbono almacenado de 103,689 ton C equivalentes a 380,538.63 ton de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto, esta reserva juega un papel muy importante no solo en cuanto a la conservación de la biodiversidad de especies, sino también en la contribución a la mitigación del cambio climático, por lo que se puede considerar como un reservorio de carbono en la actualidad.

La biomasa aérea total, viva y muerta se relaciona estrecha y positivamente con la edad o periodo de abandono y en menor medida con la pendiente, siendo la edad de sucesión el componente que mayor variación explicó (38, 37 y 25% respectivamente) en la reserva. En particular y acorde con la hipótesis 1, la biomasa aérea presentó una relación no lineal (potencial) con la edad. Por lo tanto, la edad de sucesión podría utilizarse como una variable auxiliar importante y útil para la estimación y mapeo de la biomasa aérea a través de sensores remotos.

Los sitios ubicados en cerros y específicamente en zonas intermedias fueron los que presentaron mayor biomasa aérea acumulada en comparación con los sitios con menor pendiente (zonas planas). Esto es contrario a lo planteado en la hipótesis 2 y podría deberse a que estos últimos son seleccionados preferentemente para realizar actividades agrícolas

ya que presentan mayor disponibilidad de agua, profundidad del suelo y fácil acceso, por lo que han tenido mayor intervención humana en comparación con los cerros. En contraste, en los cerros las condiciones no son muy favorables para realizar este tipo de actividades, lo que contribuye a la presencia de individuos de mayor edad y tamaño en cerros que en zonas planas. Por lo tanto, es prioritario proteger y conservar los cerros para prevenir emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, reducir la erosión de los suelos así como la degradación de los mismos.

En la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic las selvas que presentan edades mayores a los 18 años son las que mayor biomasa y carbono aéreo almacenados poseen, particularmente aquellas que se encuentran en sitios con pendientes intermedias. Por lo tanto es muy importante conservar esta reserva, en la que estas condiciones son comunes, tanto por su capacidad de almacenar el CO<sub>2</sub> atmosférico, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático, como por su importancia para la conservación de la biodiversidad.

En la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic la biomasa total y viva así como el carbono aéreo acumulados no se ven afectados por la exposición, pero sí la biomasa aérea muerta. Estos resultados dan un apoyo parcial a la hipótesis 3 cumpliéndose para la biomasa aérea muerta y no para la biomasa aérea total y viva. Por lo que este es un factor a tomar en cuenta para la prevención de incendios forestales, así como para la obtención de materia prima potencial (biomasa muerta) para el uso en bioenergía (cogeneración, pellets, procesamientos en biorrefinería y para la obtención de biocombustibles lignocelulósicos).

Entre las especies que más contribuyeron a la biomasa aérea total, así como las categorías de edad y pendiente están *Bursera simaruba*, *Lysiloma latisiliquum*, *Caesalpinia gaumeri* y *Piscidia piscipula*, entre otras. Estas especies son dominantes por su abundancia, biomasa y carbono aéreo almacenado, por lo que resultan prioritarias para estrategias de manejo como REDD+, que buscan aumentar los reservorios de carbono en estas selvas. Tomando como parámetro la densidad específica de la madera de algunas de estas especies y la biomasa aérea total, podrían ser materia prima potencial para la obtención de bioenergía en general.

## **PERSPECTIVAS**

Este estudio forma parte de uno mayor, enfocado en cuantificar los principales almacenes y flujos de carbono en las selvas medianas subcaducifolias de la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic, el cual permitirá obtener una estimación más completa del carbono total almacenado en la misma.

Como parte del proyecto general, también se plantea evaluar el incremento medio anual de la biomasa y carbono aéreo en áreas con diferentes edades de sucesión y condiciones topográficas, lo cual permitirá analizar y comparar el comportamiento dinámico de estos almacenes y flujos, hacer extrapolaciones y proyecciones, así como comparar los resultados con los de otros ecosistemas.

También sería importante realizar estudios del poder calorífico de las especies que más contribuyeron a la biomasa aérea considerando la densidad específica de las mismas, así como realizar pruebas de pre-tratamientos para determinar el potencial de las mismas para la obtención de biocombustibles lignocelulósicos.

Finalmente, es importante establecer estudios de manejo, restauración y reforestación de áreas para conservar y aumentar las reservas de carbono y de esta manera colaborar con las estrategias y objetivos de REDD+ y así contribuir en alguna medida a mitigar el cambio climático.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. K. Rose; B. Sohngen, Global forest carbon sequestration and climate policy design, *Environment and Development Economics*, vol. 16, pp. 429-454, 2011.
- [2] R. A. Houghton; K. T. Lawrence; J. L. Hackler; S. Brown, The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates, *Global Change Biology*, vol. 7, pp. 731-746, 2001.
- [3] Y. Malhi; D. D. Baldocchi; P. G. Jarvis, The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests, *Plant, Cell & Environment*, vol. 22, pp. 715-740, 1999.
- [4] Y. Malhi; A. D. Nobre; J. Grace; B. Kruijt; M. G. P. Pereira; A. Culf; S. Scott, Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 103, pp. 31593-31612, 1998.
- [5] D. J. Martín, El futuro de los biocombustibles: biorrefinerías integradas, 2009.
- [6] M. A. Cairns; I. Olmsted; J. Granados; J. Argaez, Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula, *Forest Ecology and Management*, vol. 186, pp. 125-132, 2003.
- [7] M. A. Cairns; P. K. Haggerty; R. Alvarez; B. H. J. De Jong; I. Olmsted, Tropical México is recent land-use change: a region's contribution to the global carbon cycle, *Ecological Applications*, vol. 10, pp. 1426-1441, 2000/10/01 2000.
- [8] S. Rahlao; B. Mantlana; H. Winkler; T. Knowles, South Africa's national REDD+ initiative: assessing the potential of the forestry sector on climate change mitigation, *Environmental Science & Policy*, vol. 17, pp. 24-32, 2012.
- [9] IPCC, Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry, Kanagawa, Japan, *National Greenhouse Gas Inventories Programme*, 2003.
- [10] M. Coutiño; T. Asunción, Carbono en sistemas ganaderos en un paisaje de conservación REBIMA Chiapas, México, 2010.
- [11] IPCC, Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the intergovernmental panel on climate change. *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*: Cambridge University Press, 2012.



- [12] ONU, La tierra y el Cambio Climático, citado el 25 de junio de 2015.
- [13] J. T. Hardy, Climate change causes, effects and solution., in *Climate change causes, effects and solution.*, ed, 2003.
- [14] J. Martínez; A. Fernandez, Cambio climático: una visión desde México, *vol. primera edición*, pp. 1-523, 2004.
- [15] N. E. S. T. Association. Effects of Climate Change Today. Available: [http://www.windows2universe.org/earth/climate/cli\\_effects.html](http://www.windows2universe.org/earth/climate/cli_effects.html), 7 de abril del 2015.
- [16] R. Dobles, Consecuencias de la contaminación del aire y de la atmósfera del sector energético y tendencias de las emisiones contaminantes. San José, Costa Rica, 2011.
- [17] F. Joos; R. Spahni, Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *vol. 105*, pp. 1425-1430, 2008.
- [18] E. Dlugokencky; P. Tans, Trends in atmospheric carbon dioxide, National Oceanic & Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory (NOAA/ESRL). <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>, 8 October 2013.
- [19] P. Tans; R. Keeling, Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html>, 23 de noviembre 2014.
- [20] C. Le Quéré; G. Peters; R. Andres; R. Andrew; T. Boden; P. Ciais; P. Friedlingstein; R. Houghton; G. Marland; R. Moriarty, Global carbon budget 2013, *Earth System Science Data Discussions*, *vol. 6*, 2013.
- [21] M. P. r. López, Causas, evidencias e impactos del cambio climático, p. 33, 2009.
- [22] J. F. Silva, El Protocolo de Kyoto, 2011.
- [23] UNFCCC, Caring for Climate Change. A guide to the Climate Change Convention and the Kyoto Protocol. *Issued by the Climate Change Secretariat* (UNFCCC). Bonn, Germany, p. 24, 2003.
- [24] COP21, Por un acuerdo universal sobre el clima. Desafíos de la COP21, 2015.
- [25] IBERDROLA, Naciones Unidad y el Cambio Climático, 2015.

- [26] F. Carbone, Conferencia de las Partes (COP) Plataforma sobre financiamiento climático para Latinoamérica y el Caribe, 2015.
- [27] U. Nations, Cancun Climate Change Conference - November 2010. Framework Convention on Climate Change, 2014.
- [28] J. C. Zamora, Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea en el bosque de pino del ejido “La majada” municipio de Peribán de Ramos, Michoacán, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México*, 2003.
- [29] J. Silvertown, Ecology: Individuals, Populations and Communities, *Journal of Ecology*, vol. 75, pp. 1200-1201, 1987.
- [30] O. L. Phillips; Y. Malhi; N. Higuchi; W. F. Laurance; P. V. Núñez; R. M. Vásquez; S. G. Laurance; L. V. Ferreira; M. Stern; S. Brown, Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plots, *Science*, vol. 282, pp. 439-442, 1998.
- [31] S. L. Lewis; G. Lopez-Gonzalez; B. Sonke; K. Affum-Baffoe; T. R. Baker; L. O. Ojo; O. L. Phillips; J. M. Reitsma; L. White; J. A. Comiskey; M.-N. D. K; C. E. N. Ewango; T. R. Feldpausch; A. C. Hamilton; M. Gloor; T. Hart; A. Hladik; J. Lloyd; J. C. Lovett; J.-R. Makana; Y. Malhi; F. M. Mbago; H. J. Ndangalasi; J. Peacock; K. S. H. Peh; D. Sheil; T. Sunderland; M. D. Swaine; J. Taplin; D. Taylor; S. C. Thomas; R. Votere; H. Woll, Increasing carbon storage in intact African tropical forests, *Nature*, vol. 457, pp. 1003-1006, 2009.
- [32] Food; A. O. o. t. U. Nations, *Global forest resources assessment 2010: Main report*: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010.
- [33] F. Bongers; R. Chazdon; L. Poorter; M. Peña-Claros, The potential of secondary forests, *Science (New York, NY)*, vol. 348, pp. 642-643, 2015.
- [34] M. Acosta-Mireles; J. V. Hernández; A. V. Martínez; J. D. Etchevers-Barra. (2002, Aboveground biomass estimation by means of allometric relationships in six hardwood species in Oaxaca, México. *Agrociencia* 36(6), 725-736.
- [35] R. Houghton, The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850–1990, *Tellus B*, vol. 51, pp. 298-313, 1999.
- [36] FAO, La gestión de los bosques ante el cambio climático, pp. 1-20, 2010.

- [37] J. W. d. Besten; B. Arts; P. Verkooijen, The evolution of REDD+: An analysis of discursive-institutional dynamics, *Environmental Science & Policy*, vol. 35, pp. 40-48, 2014.
- [38] A. Karsenty; A. Vogel; F. Castell, Carbon rights, REDD+ and payments for environmental services, *Environmental Science & Policy*, vol. 35, pp. 20-29, 2014.
- [39] G. van der Werf; D. Morton; R. DeFries; J. Olivier; P. Kasibhatla; R. Jackson; G. Collatz; J. Randerson, CO<sub>2</sub> emissions from forest loss, 2009.
- [40] R. O. R. Thompson; R. T. Baker; J. Healey; D. d. Castillo; G. P. J. Jones; M. R. Román, Criterios e indicadores para proyectos REDD, Proyecto Fortalecimiento de Capacidades para Pagos por Servicios Ambientales (carbono y biodiversidad) en la Amazonia Peruana, *Universidad de Leeds, Reino Unido.*, 2009.
- [41] T. Laing; C. Palmer, Economy-wide impacts of REDD when there is political influence, *Resource and Energy Economics*, vol. 40, pp. 107-126, 2015.
- [42] F. Panhwar, conserving agroforestry is the solution of future global warming and biodiversity sindh a case, 1996.
- [43] A. R. Freitas, Contribución de las industrias forestales al desarrollo económico y social de América Latina. Primer Congreso Latinoamericano IUFRO Valdivia Chile, 1998.
- [44] B. Kyrklund, Como pueden contribuir los bosques y las industrias forestales a reducir el exceso de anhídrido carbonico en la atmosfera, *Unasylva*, 1990.
- [45] C. M. Ryan; M. Williams; J. Grace, Above-and Belowground Carbon Stocks in a Miombo Woodland Landscape of Mozambique, *Biotropica*, vol. 43, pp. 423-432, 2011.
- [46] I. Gasparri; E. Manghi; I. A. C. Montenegro; L. M. G. Parmuchi; L. J. Bono; G. M. Strada, Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales Argentinas, *Informe final, Unidad de Manejo del Sistema de Evaluación Forestal, Dirección de bosques, Secretaría de ambiente y desarrollo sustentable*, 2004.

- [47] C. Figueroa, Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo, Tesis de Maestro en Ciencias. Postgrado Forestal, Colegio de Postgraduados. Monticello, México, 2010.
- [48] B. Finengan; D. Delgado, Ciclos y flujos de materia y energía: Ecosistema, océano y atmósfera. Bases Ecológicas, *Turrialba, Costa Rica. CATIE*, pp. 11-15, 1997.
- [49] W. M. Ciesla, Cambio climático bosques y ordenación forestal: Una visión de conjunto *vol. 126: Food & Agriculture Org.*, 1996.
- [50] J. M. Becknell; L. Kissing Kucek; J. S. Powers, Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis, *Forest Ecology and Management*, *vol. 276*, pp. 88-95, 2012.
- [51] M. Osterkom, Energías renovables, diagnóstico, barreras y propuestas, pp. 1-60, 2009.
- [52] R. D. Perlack; L. L. Wright; A. F. Turhollow; R. L. Graham; B. J. Stokes; D. C. Erbach, Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply, DTIC Document2005.
- [53] J. A. M. Pons, La biomasa como fuente de energía renovable, in *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 2005, pp. 32-42.
- [54] P. Rocha, Oferta disponible de biomasa forestal bajo restricciones de protección y propiedad para la producción de energía eléctrica en la comuna de Corral, Trabajo de titulación Ingeniero Forestal. *Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile*, 2009.
- [55] FAO, Bosques y energía, cuestiones clave, *Estudio FAO: Montes*, 2008.
- [56] F. Cherubini, The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals, *Energy Conversion and Management*, *vol. 51*, pp. 1412-1421, 2010.
- [57] J. E. Thornes, IPCC, 2001: Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 2001. No. of pages: 1032. Price:

- £34.95, ISBN 0-521-01500-6 (paperback), ISBN 0-521-80768-9 (hardback)," *International Journal of Climatology*, vol. 22, pp. 1285-1286, 2002.
- [58] J. Gayoso; J. Guerra; D. Alarcón, Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial, *Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile*, 2002.
- [59] T. M. Araujo; N. Higuchi; J. A. Carvalho, Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brazil, *Forest Ecology and Management*, vol. 117, p. 52, 1999.
- [60] C. C. Grier; S. R. Logan, Old-growth *Pseudotsuga menziesii* communities of a western Oregon watershed: biomass distribution and production budgets, *Ecological Monographs*, pp. 373-400, 1977.
- [61] S. Brown, Estimating biomass and biomass change of tropical forests: *a primer vol. 134*: Food & Agriculture Org., 1997.
- [62] G. K. MacDicken, A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects: *Winrock International Institute for Agricultural Development USA*, 1997.
- [63] M. S. Madrigal, Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de Carbono en bosques privados en el Área de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica, *Tesis Mag. Sc. CATIE*. Turrialba, CR, 1999.
- [64] V. E. M. Mosquera, Relación entre el carbono almacenado en la biomasa total y la composición fisionómica de la vegetación en los sistemas agroforestales con café y en bosques secundarios del Corredor Biológico Volcánica Central - Talamanca, Costa Rica, p. 68 p, 2008.
- [65] S. Brown, Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer., *Forestry Paper* p. 134, 1986.
- [66] J. Návar, Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico, *Forest Ecology and Management*, vol. 257, pp. 427-434, 2009a.
- [67] K. Mokany; R. J. Raison; S. A. Prokushkin, Critical analysis of root : shoot ratios in terrestrial biomes, *Global Change Biology*, vol. 12, pp. 84-96, 2006.

- [68] G. J. Canadell; R. M. Raupach, Managing forests for climate change mitigation, *Science*, vol. 320, pp. 1456-1457, 2008.
- [69] B. Louman, Silvicultura de bosques latifoliados húmedos con énfasis en América Central vol. 46: Catie, 2001.
- [70] H. R. Grau; M. Aide, Globalization and land-use transitions in Latin America, *Ecology and Society*, vol. 13, p. 16, 2008.
- [71] Ecured, bosque tropical, 2015.
- [72] R. Vargas; E. B. Allen; M. F. Allen, Effects of Vegetation Thinning on Above-and Belowground Carbon in a Seasonally Dry Tropical Forest in Mexico, *Biotropica*, vol. 41, pp. 302-311, 2009.
- [73] R. Houghton, Aboveground forest biomass and the global carbon balance, *Global Change Biology*, vol. 11, pp. 945-958, 2005.
- [74] D. Lu, Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, pp. 2509-2525, 2005.
- [75] R. L. Chazdon, Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, vol. 6, pp. 51-71, 2003.
- [76] R. L. Chazdon; S. G. Letcher; B. M. Van; M. R. Martínez; F. Bongers; B. Finegan, Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 362, pp. 273-289, 2007.
- [77] R. Corona, Escalando la biomasa forestal del bosque tropical seco, pp. 1-7, 2013.
- [78] G. P. Murphy; A. E. Lugo, Ecology of tropical dry forest, *Annual review of ecology and systematics*, vol. 17, pp. 67-88, 1986.
- [79] M. J. Becknell, Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis, *Forest Ecology and Management*, vol. 276, pp. 88-95, 2012.
- [80] O. Y. Uicab, Estimación de la biomasa aérea arbórea en un paisaje de selva mediana subcaducifolia en el sur del estado de Yucatán, Maestro en Ciencias Biológicas

- opción Recursos Naturales, Recursos Naturales, Centro de Investigación científica de Yucatán (CICY), Mérida, Yucatán, 2012.
- [81] Y. V. Uslar; B. Mostacedo; M. Saldias, Composición, estructura y dinámica de un bosque seco semideciduo en Santa Cruz, Bolivia, *Ecología en Bolivia*, vol. 39, pp. 25-43, 2004.
- [82] M. J. Maass; P. Balvanera; A. Castillo; C. G. Daily; A. H. Mooney; P. Ehrlich; M. Quesada; A. Miranda; J. V. Jaramillo; F. O. García, Ecosystem services of tropical dry forests: insights from longterm ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico, *Ecology and society: a journal of integrative science for resilience and sustainability*, vol. 10, pp. 1-23, 2005.
- [83] J. M. Eaton; D. Lawrence, Woody debris stocks and fluxes during succession in a dry tropical forest, *Forest Ecology and Management*, vol. 232, pp. 46-55, 2006.
- [84] A. H. Gentry, Tropical forest biodiversity: distributional patterns and their conservational significance, *Oikos*, pp. 19-28, 1992.
- [85] I. Trejo; R. Dirzo, Deforestation of seasonally dry tropical forest: a national and local analysis in Mexico, *Biological Conservation*, vol. 94, pp. 133-142, 2000.
- [86] J. M. Hoekstra; T. M. Boucher; T. H. Ricketts; C. Roberts, Confronting a biome crisis: global disparities of habitat loss and protection, *Ecology Letters*, vol. 8, pp. 23-29, 2005.
- [87] T. Urquiza-Haas; P. M. Dolman; C. A. Peres, Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: Effects of forest disturbance, *Forest Ecology and Management*, vol. 247, pp. 80-90, 2007.
- [88] E. Lebrija-Trejos; F. Bongers; E. A. Pérez-García; J. A. Meave, Successional change and resilience of a very dry tropical deciduous forest following shifting agriculture, *Biotropica*, vol. 40, pp. 422-431, 2008.
- [89] J. M. Dupuy; J. L. H. Stefanoni; R. Hernández; F. T. D. Juárez; F. M. Pat, Efectos del cambio de uso del suelo en la biomasa y diversidad de plantas leñosas en un paisaje de bosque tropical seco en Yucatán, 2012.

- [90] J. B. Kauffman; R. F. Hughes; C. Heider, Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agricultural abandonment in the neotropics, *Ecological Applications*, vol. 19, pp. 1211-1222, 2009.
- [91] S. J. Wright, Tropical forests in a changing environment, *Trends in Ecology & Evolution*, vol. 20, pp. 553-560, 2005.
- [92] R. Serrada, Influencia de los factores ecológicos en la vegetación., 2008.
- [93] C. I. Espinosa; M. De la Cruz; A. Luzuriaga; A. Escudero, Bosques tropicales secos de la región Pacífico Ecuatorial: diversidad, estructura, funcionamiento e implicaciones para la conservación, *Revista Ecosistemas*, vol. 21, 2012.
- [94] E. Cabrera, Caracterización de la vegetación natural de sucesión primaria en el Parque Nacional Volcán Pacaya y Laguna de Calderas, Guatemala, *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE)*, 2006.
- [95] J. M. D. Rada; J. L. H. Stefanoni; R. Hernández; F. T. D. Juárez; F. M. Pat, Efectos del cambio de uso del suelo en la biomasa y diversidad de plantas leñosas en un paisaje de bosque tropical seco en Yucatán, vol 4, pp. 130-140, 2012.
- [96] Isabel. La sucesión ecológica. Available: <http://foodforestmesetario.blogspot.mx/2015/08/el-quid-de-la-cuestion-la-sucesion.html> 28 de agosto de 2015.
- [97] D. A. Clark; S. Brown; D. W. Kicklighter; J. Q. Chambers; J. R. Thomlinson; J. Ni; E. A. Holland, Net primary production in tropical forests: an evaluation and synthesis of existing field data, *Ecological Applications*, vol. 11, pp. 371-384, 2001.
- [98] A. Nadal; D. Pérez-Salicrup; R. P.-G. Salcido; M. Quesada; J. Ramos-Elorduy; A. R. González; H. Rodríguez; J. Rull; G. Suzán; C. H. Vergara, Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos. pp.185.245, 2009.
- [99] M. Quesada; G. A. Sanchez-Azofeifa; M. Alvarez-Anorve; K. E. Stoner; L. Avila-Cabadilla; J. Calvo-Alvarado; A. Castillo; M. M. Espírito-Santo; M. Fagundes; G. W. Fernandes, Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives, *Forest Ecology and Management*, vol. 258, pp. 1014-1024, 2009.
- [100] J. Ewel, Tropical succession: manifold routes to maturity, *Biotropica*, pp. 2-7, 1980.



- [101] C. D. Oliver; B. C. Larson, Forest stand dynamics: McGraw-Hill, Inc., 1990.
- [102] R. L. Chazdon, Chance and determinism in tropical forest succession, *Tropical forest community ecology*, pp. 384-408, 2008.
- [103] R. P. Kauil, Acumulación de biomasa y carbono aéreo en bosques tropicales secundarios del sur de Quintana Roo, México, 2014.
- [104] W. R. Lawrence; C. F. Stuart, Interactions among processes controlling successional change, *Oikos*, pp. 131-135, 1987.
- [105] S. G. Letcher; R. L. Chazdon, Rapid Recovery of Biomass, Species Richness, and Species Composition in a Forest Chronosequence in Northeastern Costa Rica, *Biotropica*, vol. 41, pp. 608-617, 2009.
- [106] R. C. Luizão; F. J. Luizão; R. Q. Paiva; T. F. Monteiro; L. S. Sousa; B. Kruijt, Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest, *Global Change Biology*, vol. 10, pp. 592-600, 2004.
- [107] J. M. Dupuy; J. L. Hernández Stefanoni; R. A. Hernández Juárez; E. Tetetla Rangel; J. O. López Martínez; E. Leyequién Abarca; F. J. Tun Dzul; F. May Pat, Patterns and correlates of tropical dry forest structure and composition in a highly replicated chronosequence in Yucatan, Mexico, *Biotropica*, vol. 44, pp. 151-162, 2012.
- [108] A. Chauvel; Y. Lucas; R. Boulet, On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil, *Experientia*, vol. 43, pp. 234-241, 1987.
- [109] A. Robert, Simulation of the effect of topography and tree falls on stand dynamics and stand structure of tropical forests, *Ecological Modelling*, vol. 167, pp. 287-303, 2003.
- [110] M. I. Daws; C. E. Mullins; D. F. Burslem; S. R. Paton; J. W. Dalling, Topographic position affects the water regime in a semideciduous tropical forest in Panama, *Plant and Soil*, vol. 238, pp. 79-89, 2002.
- [111] X. Gong; H. Brueck; K. Giese; L. Zhang; B. Sattelmacher; S. Lin, Slope aspect has effects on productivity and species composition of hilly grassland in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China, *Journal of arid environments*, vol. 72, pp. 483-493, 2008.

- [112] M. Sternberg; M. Shoshany, Influence of slope aspect on Mediterranean woody formations: comparison of a semiarid and an arid site in Israel, *Ecological Research*, vol. 16, pp. 335-345, 2001.
- [113] B. L. Castillo; M. M. Monforte; R. P. Enriquez, Manifestación de impacto ambiental modalidad particular, como requisito para el desarrollo de turismo ecológico en el predio rústico denominado kiuic, ubicado en el municipio de oxkutzcab, yucatán, México, 2004.
- [114] J. L. Hernández-Stefanoni; J. Dupuy; F. Tun-Dzul; F. May-Pat, Influence of landscape structure and stand age on species density and biomass of a tropical dry forest across spatial scales, *Landscape Ecology*, vol. 26, pp. 355-370, 2011/03/01 2011.
- [115] Y. G. M. Téllez, Análisis de la estructura poblacional de especies arbóreas, en diferentes edades sucesionales, en una selva mediana subcaducifolia en Yucatán, Grado de maestra en Ciencias y Biotecnología de Plantas, Recursos Naturales, Centro de investigación científica de Yucatán (CICY), Mérida, yucatán, 2008.
- [116] O. d. C. c. d. Yucatán.. Tipos de climas (Sistema de clasificación climática de Koopen modificado por García. Available: [http://www.cambioclimatico.yucatan.gob.mx/atlas-cambioclimatico/pdf/tipos\\_climas.pdf](http://www.cambioclimatico.yucatan.gob.mx/atlas-cambioclimatico/pdf/tipos_climas.pdf) 22 de octubre 2014.
- [117] F. Miranda, Vegetación de la península Yucateca, *Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura, Chapingo, México*, 1994.
- [118] J. L. H. Stefanoni; J. M. Dupuy; K. D. Johnson; R. Birdsey; F. T. Dzul; A. Peduzzi; J. p. C. Sosa; G. S. Santos; M. D. López, Improving Species Diversity and Biomass Estimates of Tropical Dry Forests Using Airborne LiDAR, *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 4741-4763, 2014.
- [119] J. Duch Gary, La conformación territorial del estado de Yucatán: los componentes del medio físico, *Universidad Autónoma de Chapingo, Centro Regional de la Península de Yucatán*, 1988.
- [120] INFyS, Inventario Nacional Forestal y de Suelos, 2009.

- [121] S. Walker; T. Pearson; F. Casarim; N. Harris; S. Petrova; A. Grais; E. Swails; M. Netzer; K. Goslee; S. Brown, Standard operating procedures for terrestrial carbon measurement: Version 2012, *Winrock International*, 2012.
- [122] R. MEX-SMIC. Red Mexicana de sitios de monitoreo intensivo del carbono. Available: <http://www.mrv.mx/index.php/es/mrv-m/areas-de-trabajo/mexsmic/red-mex-smic.html> 14 de septiembre del 2015.
- [123] T. H. Urquiza; M. P. Dolman; C. A. Peres, Regional scale variation in forest structure and biomass in the Yucatan Peninsula, Mexico: Effects of forest disturbance, *Forest Ecology and Management*, vol. 247, pp. 80-90, 2007.
- [124] J. Chave; R. Condit; S. Lao; J. P. Caspersen; R. B. Foster; S. P. Hubbell, Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama, *Journal of Ecology*, vol. 91, pp. 240-252, 2003.
- [125] J. L. Frangi; A. E. Lugo, Ecosystem dynamics of a subtropical floodplain forest, *Ecological Monographs*, pp. 351-369, 1985.
- [126] CONAFOR., Inventario Nacional forestal y de Suelos. Manual y procedimientos para el muestreo de campo, 2009.
- [127] F. Kollmann, Ed., Tecnología de la madera y sus aplicaciones. IFIE, Madrid, España, 1959, p.^pp. Pages.
- [128] Z. Dai; R. A. Birdsey; K. D. Johnson; J. M. Dupuy; J. L. Hernandez-Stefanoni; K. Richardson, "Modeling Carbon Stocks in a Secondary Tropical Dry Forest in the Yucatan Peninsula, Mexico," *Water, Air, & Soil Pollution*, vol. 225, pp. 1-15, 2014.
- [129] V. J. Jaramillo; J. B. Kauffman; L. Rentería-Rodríguez; D. L. Cummings; L. J. Ellingson, Biomass, carbon, and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes, *Ecosystems*, vol. 6, pp. 609-629, 2003.
- [130] J. M. Eaton; D. Lawrence, Loss of carbon sequestration potential after several decades of shifting cultivation in the Southern Yucatán, *Forest Ecology and Management*, vol. 258, pp. 949-958, 2009.
- [131] J. Chave; J. Olivier; F. Bongers; P. Châtelet; P.-M. Forget; P. van der Meer; N. Norden; B. Riéra; P. Charles-Dominique, Above-ground biomass and productivity

- in a rain forest of eastern South America, *Journal of Tropical Ecology*, vol. 24, pp. 355-366, 2008.
- [132] C. V. de Castilho; W. E. Magnusson; R. N. O. de Araújo; R. C. Luizao; F. J. Luizao; A. P. Lima; N. Higuchi, Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian Forest: Effects of soil and topography, *Forest Ecology and Management*, vol. 234, pp. 85-96, 2006.
- [133] W. Fonseca; J. M. R. Benayas; F. E. Alice, Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica, *Forest Ecology and Management*, vol. 262, pp. 1400-1408, 2011.
- [134] v. M. Breugel, Dynamics of secondary forests, WUR Wageningen UR, 2007.
- [135] D. B. Clark; J. Hurtado; S. S. Saatchi, Tropical Rain Forest Structure, Tree Growth and Dynamics along a 2700-m Elevational Transect in Costa Rica, *PloS one*, vol. 10, 2015.
- [136] C. V. de Castilho; W. E. Magnusson; R. N. O. de Araújo; R. C. Luizao; F. J. Luizao; A. P. Lima; N. Higuchi, Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian Forest: Effects of soil and topography, *Forest Ecology and Management*, vol. 234, pp. 85-96, 2006.
- [137] J. G. Saldarriaga; D. C. West; M. Tharp; C. Uhl, Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela, *The Journal of Ecology*, pp. 938-958, 1988.
- [138] J. L. Hernández-Stefanoni; J. M. Dupuy; K. D. Johnson; R. Birdsey; F. Tun-Dzul; A. Peduzzi; J. P. Caamal-Sosa; G. Sánchez-Santos; D. López-Merlín, Improving Species Diversity and Biomass Estimates of Tropical Dry Forests Using Airborne LiDAR, *Remote Sensing*, vol. 6, pp. 4741-4763, 2014.
- [139] C. A. Ulate Quesada, Análisis y comparación de la biomasa aérea de la cobertura forestal según zona de vida y tipo de bosque para costa rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Forestal, 2011.
- [140] A. P. Yepes; J. I. del Valle; S. L. Jaramillo; S. A. Orrego, Recuperación estructural en bosques sucesionales andinos de Porce (Antioquia, Colombia), *International Journal of Tropical Biology and Conservation*, vol. 58, 2009.

- [141] L. Read; D. Lawrence, Recovery of biomass following shifting cultivation in dry tropical forests of the Yucatan, *Ecological Applications*, vol. 13, pp. 85-97, 2003.
- [142] G. Segura; P. Balvanera; E. Durán; A. Pérez, Tree community structure and stem mortality along a water availability gradient in a Mexican tropical dry forest, *Plant Ecology*, vol. 169, pp. 259-271, 2002.
- [143] D. White; C. Hood, Vegetation patterns and environmental gradients in tropical dry forests of the northern Yucatan Peninsula, *Journal of vegetation science*, vol. 15, pp. 151-160, 2004.
- [144] P. Sollins, Factors influencing species composition in tropical lowland rain forest: does soil matter?, *Ecology*, vol. 79, pp. 23-30, 1998.
- [145] P. Lavelle; A. V. Spain, Soil ecology, in *springer-Verslag*, ed, p. 688, 2002.
- [146] D. B. Clark; D. A. Clark, Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest, *Forest Ecology and Management*, vol. 137, pp. 185-198, 2000.
- [147] J. Quiroz-Carranza; R. Orellana, Use and management of firewood in dwellings of six localities from Yucatan, Mexico, *Madera Y Bosques*, vol. 16, pp. 47-67, 2010.

## ANEXOS

### ANEXO A.

**Tabla 1.** Listado de especies, número de individuos, biomasa aérea total y su equivalente en porcentaje registrado en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.

NC_CRONQUIS	Familia	N° de individuos	Biomasa aérea total ton/ha	% de biomasa aérea total por sp
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Burseraceae	246	20.0705	20.3496
<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	Fabaceae	208	15.384	15.5979
<i>Caesalpinia gaumeri</i> Greenm.	Fabaceae	153	13.1558	13.3387
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	Fabaceae	192	7.453	7.5566
<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.	Verbenaceae	92	5.2807	5.3541
<i>Thouinia paucidentata</i> Radlk.	Sapindaceae	225	4.1268	4.1842
<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundell	Fabaceae	261	2.7627	2.8011
<i>Acacia gaumeri</i> S. F. Blake.	Fabaceae	141	2.4929	2.5276
<i>Gymnopodium floribundum</i> Rolfe.	Polygonaceae	199	2.3065	2.3386
<i>Coccoloba spicata</i> Lundell.	Polygonaceae	180	2.1527	2.1827
<i>Erythroxylum rotundifolium</i> Lunan.	Erythroxylaceae	121	1.8768	1.9029
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	Bixaceae	87	1.2768	1.2945
<i>Platymiscium yucatanum</i> Standley.	Fabaceae	34	1.1169	1.1324

<i>Hippocratea excelsa</i> Kunth.	Hippocrateaceae	87	1.0229	1.0371
<i>Luehea candida</i> Mart.	Malvaceae	59	0.9431	0.9563
<i>Talisia olivaeformis</i> (Kunth) Radlk.	Sapindaceae	71	0.7419	0.7522
<i>Apoplanesia paniculata</i> C. Presl.	Fabaceae	34	0.6953	0.705
<i>Diospyros cuneata</i> Standl.	Ebenaceae	124	0.6446	0.6535
<i>Mimosa bahamensis</i> Benth.	Fabaceae	123	0.6329	0.6417
<i>Chloroleucon mangense</i> (Jacq.) Britton & Rose	Fabaceae	29	0.6005	0.6089
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	Fabaceae	7	0.5968	0.6051
<i>Sideroxylon obtusifolium</i> (Roemer & Schultes) T. D. Penn.	Sapotaceae	93	0.5357	0.5432
<i>Karwinskia humboldtiana</i> (J. A. Schultes) Zucc.	Rhamnaceae	27	0.5342	0.5416
<i>Exostema caribaeum</i> (Jacq.) Roem. & Schult.	Rubiaceae	71	0.5266	0.534
<i>Trichilia glabra</i> L.	Meliaceae	51	0.5043	0.5113
<i>Albizia tomentosa</i> (Micheli) Standl.	Fabaceae	34	0.4964	0.5033
<i>Coccoloba acapulcensis</i> Standl.	Polygonaceae	28	0.4725	0.4791
<i>Jatropha gaumeri</i> Greenm.	Euphorbiaceae	55	0.4442	0.4503
<i>Neomillspaughia emarginata</i> (Gross) Blake.	Polygonaceae	117	0.4405	0.4467
<i>Spondias mombin</i> L.	Anacardiaceae	12	0.4265	0.4325
<i>Malpighia glabra</i> L.	Malpighiaceae	61	0.3947	0.4001
<i>Neea psychotrioides</i> Donn. Sm.	Nyctaginaceae	127	0.3915	0.3969
<i>Diospyros anisandra</i> S. F. Blake	Ebenaceae	105	0.3692	0.3743
<i>Exostema mexicanum</i> A. Gray.	Rubiaceae	21	0.3568	0.3618

<i>Lonchocarpus rugosus</i> Benth.	Fabaceae	71	0.3552	0.3602
<i>Luehea speciosa</i> Willd.	Malvaceae	16	0.3522	0.3571
<i>Bourreria pulchra</i> Millsp.	Boraginaceae	25	0.3504	0.3552
<i>Guettarda elliptica</i> Sw.	Rubiaceae	57	0.3295	0.3341
<i>Ehretia tinifolia</i> L.	Boraginaceae	19	0.294	0.2981
<i>Acacia pennatula</i> (Cham. & Schltdl.) Benth.	Fabaceae	34	0.2719	0.2757
<i>Psidium sartorianum</i> (O. Berg) Nied.	Myrtaceae	47	0.2696	0.2733
<i>Machaonia lindeniana</i> Baillon.	Rubiaceae	67	0.2353	0.2386
<i>Arrabidaea floribunda</i> (Kunth) Loes.	Bignoniaceae	46	0.2317	0.235
<i>Alvaradoa amorphoides</i> Liebm	Simaroubaceae	12	0.2305	0.2337
<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) Nicholson ssp. <i>chrysantha</i> .	Bignoniaceae	28	0.2283	0.2314
<i>Zapoteca formosa</i> (Kunth) H. Hern. ssp. <i>formosa</i> .	Fabaceae	27	0.1845	0.1871
<i>Senna atomaria</i> (L.) H. S. Irwin & Barneby.	Fabaceae	40	0.1799	0.1824
<i>Lonchocarpus hondurensis</i> Benth.	Fabaceae	9	0.1584	0.1606
<i>Celtis iguanaea</i> (Jacq.) Sarg.	Ulmaceae	3	0.1445	0.1465
<i>Coccoloba diversifolia</i> Jacq.	Polygonaceae	14	0.1435	0.1455
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	Fabaceae	8	0.1424	0.1444
<i>Agonandra obtusifolia</i> Standl.	Opiliaceae	12	0.1354	0.1373
<i>Croton glabellus</i> L.	Euphorbiaceae	76	0.131	0.1328
<i>Diospyros verae-crucis</i> (Standl.) Standl.	Ebenaceae	40	0.1148	0.1163
<i>Lonchocarpus longistylus</i> Pittier.	Fabaceae	3	0.1084	0.1099



<i>Randia obcordata</i> S. Watson.	Rubiaceae	38	0.1026	0.1041
<i>Cedrela odorata</i> L.	Meliaceae	1	0.1024	0.1038
<i>Eugenia axillaris</i> (Sw.) Willd.	Myrtaceae	47	0.095	0.0963
<i>Colubrina elliptica</i> (Sw.) Brizicky & W. L. Stern.	Rhamnaceae	11	0.0933	0.0946
<i>Plumeria obtusa</i> L.	Apocynaceae	3	0.0909	0.0922
<i>Heliocarpus donnell-smithii</i> Rose.	Tiliaceae	27	0.0906	0.0919
<i>Caesalpinia mollis</i> (Kunth) Spreng.	Fabaceae	5	0.0877	0.0889
<i>Bauhinia divaricata</i> L.	Fabaceae	66	0.08	0.0811
<i>Cosmocalyx spectabilis</i> Standl.	Rubiaceae	5	0.0799	0.081
<i>Guettarda combsii</i> Urb.	Rubiaceae	26	0.0751	0.0762
<i>Ceiba aesculifolia</i> (Kunth) Britten & Baker f.	Malvaceae	1	0.0727	0.0738
<i>Thevetia gaumeri</i> Hemsl.	Apocynaceae	11	0.0721	0.0731
<i>Zuelania guidonia</i> (Sw.) Britton & Millsp.	Salicaceae	7	0.0709	0.0719
<i>Pisonia aculeata</i> L.	Nyctaginaceae	14	0.0704	0.0714
<i>Cordia gerascanthus</i> L.	Boraginaceae	5	0.0689	0.0699
<i>Cojoba arborea</i> Britton & Rose.	Fabaceae	1	0.0644	0.0653
<i>Sabal yapa</i> C. Wright ex Becc.	Arecaceae	4	0.06	0.0609
<i>Heteropterys laurifolia</i> (L.) A. Juss.	Malpighiaceae	10	0.0567	0.0575
<i>Bunchosia swartziana</i> Griseb.	Malpighiaceae	50	0.0542	0.0549
<i>Caesalpinia yucatanensis</i> Greenm.	Fabaceae	10	0.052	0.0527
<i>Dalbergia glabra</i> (Mill.) Standl.	Fabaceae	5	0.0491	0.0497

<i>Eugenia buxifolia</i> (Sw.) Willd.	Myrtaceae	31	0.0488	0.0495
<i>Cissus gossypifolia</i> Standl.	Vitaceae	15	0.047	0.0477
<i>Senna racemosa</i> (Mill.) H. S. Irwin & Barneby.	Fabaceae	21	0.047	0.0477
<i>Bourreria oxyphylla</i> Standl.	Boraginaceae	10	0.0469	0.0475
<i>Guettarda gaumeri</i> Standl.	Rubiaceae	17	0.0443	0.0449
<i>Bauhinia unguolata</i> L.	Fabaceae	20	0.0426	0.0432
<i>Chlorophora tinctoria</i> (L.) Gaundich. Ex Benth.	Moraceae	2	0.041	0.0416
<i>Diphysa carthagenensis</i> Jacq.	Fabaceae	12	0.0405	0.0411
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit.	Fabaceae	15	0.0399	0.0405
<i>Randia longiloba</i> Hemsl.	Rubiaceae	6	0.0368	0.0373
<i>Mansoa verrucifera</i> (Schltdl.) A. H. Gentry.	Bignoniaceae	14	0.0362	0.0367
<i>Schoepfia schreberi</i> J. F. Gmel.	Olacaceae	4	0.035	0.0355
<i>Colubrina arborescens</i> (Mill.) Sarg.	Rhamnaceae	2	0.0306	0.0311
<i>Acacia dolichostachya</i> S. F. Blake.	Fabaceae	5	0.0291	0.0295
<i>Pithecoctenium crucigerum</i> (L.) A. H. Gentry.	Bignoniaceae	5	0.0289	0.0293
<i>Colubrina greggii</i> S. Watson var. <i>yucatanensis</i> M. C. Johnst.	Rhamnaceae	24	0.0281	0.0285
<i>Ardisia escallonioides</i> Schltdl. & Cham.	Myrsinaceae	7	0.0277	0.0281
<i>Krugiodendron ferreum</i> (Vahl) Urb.	Rhamnaceae	11	0.0276	0.028
<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Malvaceae	2	0.0268	0.0272
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	Fabaceae	2	0.0265	0.0268
<i>Diospyros yatesiana</i> Satandl.	Ebenaceae	9	0.0264	0.0268

<i>Capparis flexuosa</i> (L.) L.	Capparaceae	3	0.0249	0.0252
<i>Cydista potosina</i> (K. Schum. & Loes.) Loes.	Bignoniaceae	6	0.0208	0.0211
<i>Hintonia octomera</i> (Hemsl.) Bullock.	Rubiaceae	5	0.0201	0.0204
<i>Croton reflexifolius</i> Kunth.	Euphorbiaceae	19	0.02	0.0203
<i>Zanthoxylum caribaeum</i> Lam.	Rutaceae	6	0.0196	0.0199
<i>Heteropterys brachiata</i> (L.) DC.	Malpighiaceae	5	0.0185	0.0188
<i>Ceratophytum tetragonolobum</i> (Jacq.) Sprague	Bignoniaceae	3	0.0175	0.0177
<i>Bunchosia glandulosa</i> (Cav.) DC.	Malpighiaceae	22	0.0165	0.0167
<i>Helicteres baruensis</i> Jacq.	Malvaceae	26	0.0163	0.0165
<i>Neea</i> sp.	Nyctaginaceae	1	0.0146	0.0148
<i>Cnidoscopus aconitifolius</i> (Mill.) I. M. Johnston.	Euphorbiaceae	10	0.014	0.0142
<i>Stizophyllum riparium</i> (Kunth) Sandwith.	Bignoniaceae	4	0.0131	0.0133
<i>Arrabidaea podopogon</i> (DC.) A. H. Gentry.	Bignoniaceae	7	0.013	0.0131
<i>Talisia floresii</i> Standl.	Sapindaceae	7	0.012	0.0121
<i>Cydista diversifolia</i> (Kunth) Miers.	Bignoniaceae	5	0.0118	0.012
<i>Allophyllus cominia</i> (L.) Sw.	Sapindaceae	1	0.0116	0.0118
<i>Casearia emarginata</i> Wr.	Salicaceae	11	0.0111	0.0112
<i>Ceiba schottii</i> Britt. & Baker.	Malvaceae	1	0.0104	0.0105
<i>Hiraea reclinata</i> Jacq.	Malpighiaceae	5	0.0102	0.0103
<i>Calyptranthes pallens</i> Griseb.	Myrtaceae	11	0.0097	0.0098
<i>Jacquinia macrocarpa</i> Cav. ssp. <i>macrocarpa</i>	Theophrastaceae	6	0.0097	0.0098

<i>Amphilophium paniculatum</i> var. <i>molle</i> (Schltdl. & Cham.) Standl.	Bignoniaceae	4	0.0096	0.0097
<i>Celtis trinervia</i> Lam.	Ulmaceae	1	0.0087	0.0088
<i>Psychotria microdon</i> (D. C.) Urb.	Rubiaceae	1	0.0079	0.008
<i>Astrocasia tremula</i> (Griseb.) G. L. Webster.	Phyllanthaceae	4	0.0071	0.0072
<i>Samyda yucatanensis</i> Standl.	Salicaceae	7	0.007	0.0071
<i>Sapranthus campechianus</i> (Kunth) Standl.	Annonaceae	7	0.0065	0.0066
<i>Diospyros salicifolia</i> Humbl. & Bonpl. Ex Willd.	Ebenaceae	6	0.0063	0.0064
<i>Forchhammeria trifoliata</i> Radlk.	Capparaceae	7	0.0062	0.0063
<i>Chiococca alba</i> (L.) Hitchc.	Rubiaceae	8	0.0055	0.0056
<i>Montanoa atriplicifolia</i> (Pers.) Sch. Bip.	Asteraceae	3	0.0054	0.0055
<i>Otopappus guatemalensis</i> (Urb.) R.L. Hartman & Stuessy.	Asteraceae	1	0.0052	0.0053
<i>Randia truncata</i> Greenm. & C. H. Thomps.	Rubiaceae	6	0.0049	0.0049
<i>Cardiospermum halicacabum</i> L.	Sapindaceae	2	0.0048	0.0049
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i> Pittier.	Fabaceae	1	0.0048	0.0049
<i>Otopappus scaber</i> S. F. Blake.	Asteraceae	1	0.0044	0.0044
<i>Callicarpa acuminata</i> Kunth.	Verbenaceae	7	0.004	0.0041
<i>Amphilophium paniculatum</i> var. <i>paniculatum</i> (L.) Kunth var. <i>paniculatum</i> .	Bignoniaceae	2	0.0039	0.004
<i>Casearia subsessiflora</i> Sw.	Salicaceae	3	0.0032	0.0033
<i>Erythrina standleyana</i> Krukoff.	Fabaceae	6	0.0031	0.0031
<i>Eugenia itzana</i> Lundell.	Myrtaceae	6	0.0031	0.0032
<i>Malmea depressa</i> (Baillon) R. E. Fr.	Annonaceae	5	0.0031	0.0032

<i>Phyllanthus acuminatus</i> Vahl.	Phyllanthaceae	1	0.0029	0.0029
<i>Tabernaemontana alba</i> Mill.	Apocynaceae	3	0.0028	0.0029
<i>Cydista heterophylla</i> Seibert.	Bignoniaceae	1	0.0027	0.0027
<i>Cynanchum schlechtendalii</i> (Decne.) Standl. & Steyerl.	Asclepiadaceae	1	0.0024	0.0024
<i>Securidaca diversifolia</i> (L.) S. F. Blake.	Polygalaceae	1	0.0024	0.0024
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Malvaceae	2	0.0023	0.0023
<i>Laetia thamnia</i> L.	Salicaceae	1	0.0022	0.0023
<i>Macfadyena unguis-cati</i> (L.) A. H. Gentry.	Bignoniaceae	1	0.0021	0.0021
<i>Parmeniera millspaughiana</i> L.O. Williams.	Bignoniaceae	3	0.0019	0.002
<i>Malpighia</i> sp L.	Malpighiaceae	2	0.0018	0.0018
<i>Casearia corymbosa</i> Kunth.	Salicaceae	1	0.001	0.001
<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume.	Ulmaceae	2	0.001	0.001
<i>Acacia cornígera</i> (L.) Willd.	Fabaceae	1	0.0009	0.0009
<i>Ximenia americana</i> L.	Olacaceae	1	0.0009	0.0009
<i>Solanum erianthum</i> D. Don.	Solanaceae	2	0.0008	0.0008
<i>Hampea trilobata</i> Standl.	Malvaceae	1	0.0007	0.0007
<i>Attilaea abalak</i> E. Martínez & Ramos.	Anacardiaceae	1	0.0004	0.0004
<i>Hybanthus yucatanensis</i> Millps.	Violaceae	1	0.0004	0.0004
<i>Parathesis cubana</i> (A. DC.) Molinet & M. Gómez.	Myrsinaceae	1	0.0004	0.0004
<i>Asemnantha pubescens</i> Hook F.	Rubiaceae	1	0.0003	0.0003
<i>Manihot aesculifolia</i> (Kunth) Pohl.	Euphorbiaceae	1	0.0003	0.0003

## ANEXO B.

**Tabla 2.** Listado de familias, número de individuos y biomasa aérea total registrados en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.

<b>Familia</b>	<b>Nº individuos</b>	<b>Biomasa aérea total ton ha<sup>-1</sup></b>
Fabaceae	1395	44.5342
Burseraceae	246	20.0705
Polygonaceae	538	5.5158
Verbenaceae	99	5.2847
Sapindaceae	306	4.8971
Rubiaceae	416	2.8485
Fabaceae	181	2.7948
Erythroxylaceae	121	1.8768
Malvaceae	108	1.4245
Bixaceae	87	1.2768
Ebenaceae	284	1.1613
Boraginaceae	59	0.7602
Rhamnaceae	75	0.7138
Bignoniaceae	131	0.6481
Euphorbiaceae	161	0.6095
Meliaceae	52	0.6067
Malpighiaceae	155	0.5526
Sapotaceae	93	0.5357
Nyctaginaceae	142	0.4765
Anacardiaceae	13	0.4270
Myrtaceae	142	0.4263
Simaroubaceae	12	0.2305
Apocynaceae	17	0.1659
Ulmaceae	6	0.1542

---

Opiliaceae	12	0.1354
Salicaceae	30	0.0955
Tiliaceae	27	0.0906
Arecaceae	4	0.0600
Vitaceae	15	0.0490
Moraceae	2	0.0410
Olacaceae	5	0.0359
Capparaceae	10	0.0310
Myrsinaceae	8	0.0281
Rutaceae	6	0.0196
Asteraceae	5	0.0151
Phyllanthaceae	5	0.0100
Theophrastaceae	6	0.0097
Annonaceae	12	0.0096
Asclepiadaceae	1	0.0024
Polygalaceae	1	0.0024
Solanaceae	2	0.0008
Violaceae	1	0.0004

---

## ANEXO C.

**Tabla 3.** Listado de especies con su respectivo valor de densidad específica de la madera presentes en la Reserva Biocultural Kaxil-Kiuic.

NC_CRONQUIS	Familia	Densidad específica	Fuente
<i>Acacia cornígera</i> (L.) Willd.	Fabaceae	0.70	promedio de la región
<i>Acacia dolichostachya</i> S. F. Blake.	Fabaceae	0.75	promedio género
<i>Acacia gaumeri</i> S. F. Blake.	Fabaceae	0.72	Reyes-García et al 2012
<i>Acacia pennatula</i> (Cham. & Schltdl.) Benth.	Fabaceae	0.96	Hidayat y Simpson, 1994
<i>Agonandra obtusifolia</i> Standl.	Opiliaceae	0.70	promedio de la región
<i>Albizia tomentosa</i> (Micheli) Standl.	Fabaceae	0.45	Hidayat y Simpson, 1994
<i>Allophyllus cominia</i> (L.) Sw.	Sapindaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Alvaradoa amorphoides</i> Liebm	Simaroubaceae	0.54	Reyes-García et al 2012
<i>Amphilophium paniculatum</i> var. <i>Molle</i> (Schltdl. & Cham.) Standl	Bignoniaceae	0.58	Sanapre
<i>Amphilophium paniculatum</i> var. <i>Paniculatum</i> (L.) Kunth var. <i>paniculatum</i> .	Bignoniaceae	0.58	Sanapre
<i>Apoplanesia paniculata</i> C. Presl.	Fabaceae	0.70	Reyes-García et al 2012
<i>Ardisia escallonioides</i> Schltdl. & Cham.	Myrsinaceae	0.70	promedio de la región
<i>Arrabidaea floribunda</i> (Kunth) Loes.	Bignoniaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Arrabidaea podopogon</i> (DC.) A. H. Gentry.	Bignoniaceae	0.51	promedio lianas Sanapre



<i>Asemnantha pubescens</i> Hook F.	Rubiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Astrocasia tremula</i> (Griseb.) G. L. Webster.	Phyllanthaceae	0.70	promedio de la región
<i>Attilaea abalak</i> E. Martínez & Ramos.	Anacardiaceae	0.48	promedio género
<i>Bauhinia divaricata</i> L.	Fabaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Bauhinia unguolata</i> L.	Fabaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Bourreria oxyphylla</i> Standl.	Boraginaceae	0.69	promedio género
<i>Bourreria pulchra</i> Millsp.	Boraginaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Bunchosia glandulosa</i> (Cav.) DC.	Malpighiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Bunchosia swartziana</i> Griseb.	Malpighiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Bursera simaruba</i> (L.) Sarg.	Burseraceae	0.38	Silva Guzmán et al (2010)
<i>Caesalpinia gaumeri</i> Greenm.	Fabaceae	0.74	Reyes
<i>Caesalpinia mollis</i> (Kunth) Spreng.	Fabaceae	0.70	promedio de la región
<i>Caesalpinia yucatanensis</i> Greenm.	Fabaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Callicarpa acuminata</i> Kunth.	Verbenaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Calyptranthes pallens</i> Griseb.	Myrtaceae	0.70	promedio de la región
<i>Capparis flexuosa</i> (L.) L.	Capparaceae	0.67	promedio género
<i>Cardiospermum halicacabum</i> L.	Sapindaceae	0.51	Sanapre
<i>Casearia corymbosa</i> Kunth.	Salicaceae	0.67	Barajas Morales (1987)
<i>Casearia emarginata</i> Wr.	Salicaceae	0.62	Reyes <i>et al.</i> , 1992
<i>Casearia subsessiflora</i> Sw.	Salicaceae	0.65	promedio género
<i>Cedrela odorata</i> L.	Meliaceae	0.40	Echenique-Manrique y Col. (1975)

<i>Ceiba aesculifolia</i> (Kunth) Britten & Baker f.	Malvaceae	0.48	Barajas, 1987
<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn.	Malvaceae	0.19	Martínez y Martínez-Pinillos (1996)
<i>Ceiba schottii</i> Britt. & Baker.	Malvaceae	0.48	Reyes-García et al 2012
<i>Celtis iguanaea</i> (Jacq.) Sarg.	Ulmaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Celtis trinervia</i> Lam.	Ulmaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Ceratophytum tetragonolobum</i> (Jacq.) Sprague	Bignoniaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Chiococca alba</i> (L.) Hitchc.	Rubiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Chloroleucon mangense</i> (Jacq.) Britton & Rose	Fabaceae	0.60	Sanapre
<i>Chlorophora tinctoria</i> (L.) Gaundich. Ex Benth.	Moraceae	0.71	FAO
<i>Cissus gossypiifolia</i> Standl.	Vitaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Cnidocolus aconitifolius</i> (Mill.) I. M. Johnston.	Euphorbiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Coccoloba acapulcensis</i> Standl.	Polygonaceae	0.66	Sanapre
<i>Coccoloba diversifolia</i> Jacq.	Polygonaceae	0.80	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Coccoloba spicata</i> Lundell.	Polygonaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	Bixaceae	0.27	Barajas Morales (1987)
<i>Cojoba arborea</i> Britton & Rose.	Fabaceae	0.55	Sotomayor Castellanos y col. (2008)
<i>Colubrina arborescens</i> (Mill.) Sarg.	Rhamnaceae	0.79	promedio género
<i>Colubrina elliptica</i> (Sw.) Brizicky & W. L. Stern.	Rhamnaceae	0.80	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Colubrina greggii</i> S. Watson var. <i>yucatanensis</i> M. C. Johnst.	Rhamnaceae	0.70	promedio de la región
<i>Cordia gerascanthus</i> L.	Boraginaceae	0.75	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Cosmocalyx spectabilis</i> Standl.	Rubiaceae	0.64	Promedio total en este estudio

---

<i>Croton glabellus</i> L.	Euphorbiaceae	0.70	promedio de la región
<i>Croton reflexifolius</i> Kunth.	Euphorbiaceae	0.70	promedio de la región
<i>Cydista diversifolia</i> (Kunth) Miers.	Bignoniaceae	0.51	Sanapre
<i>Cydista heterophylla</i> Seibert.	Bignoniaceae	0.51	Sanapre
<i>Cydista potosina</i> (K. Schum. & Loes.) Loes.	Bignoniaceae	0.51	Sanapre
<i>Cynanchum schlechtendalii</i> (Decne.) Standl. & Steyerm.	Asclepiadaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Dalbergia glabra</i> (Mill.) Standl.	Fabaceae	0.47	Sanapre
<i>Diospyros anisandra</i> S. F. Blake	Ebenaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Diospyros cuneata</i> Standl.	Ebenaceae	0.66	Reyes
<i>Diospyros salicifolia</i> Humbl. & Bonpl. Ex Willd.	Ebenaceae	0.70	promedio de la región
<i>Diospyros verae-crucis</i> (Standl.) Standl.	Ebenaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Diospyros yatesiana</i> Standl.	Ebenaceae	0.70	promedio de la región
<i>Diphysa carthagenensis</i> Jacq.	Fabaceae	0.70	promedio de la región
<i>Ehretia tinifolia</i> L.	Boraginaceae	0.70	promedio de la región
<i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.	Fabaceae	0.34	FAO
<i>Erythrina standleyana</i> Krukoff.	Fabaceae	0.31	promedio género
<i>Erythroxylum rotundifolium</i> Lunan.	Erythroxylaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Eugenia axillaris</i> (Sw.) Willd.	Myrtaceae	0.75	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Eugenia buxifolia</i> (Sw.) Willd.	Myrtaceae	0.70	promedio de la región
<i>Eugenia itzana</i> Lundell.	Myrtaceae	0.72	promedio género
<i>Exostema caribaeum</i> (Jacq.) Roem. & Schult.	Rubiaceae	0.99	Barajas Morales (1987)

---

---

<i>Exostema mexicanum</i> A. Gray.	Rubiaceae	0.70	promedio de la región
<i>Forchhammeria trifoliata</i> Radlk.	Capparaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Gliricidia sepium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	Fabaceae	0.64	Barajas Morales (1987)
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	Malvaceae	0.36	Erdoiza Sordo y Castillo Morales (1992)
<i>Guettarda combsii</i> Urb.	Rubiaceae	0.70	promedio de la región
<i>Guettarda elliptica</i> Sw.	Rubiaceae	0.58	Reyes
<i>Guettarda gaumeri</i> Standl.	Rubiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Gymnopodium floribundum</i> Rolfe.	Polygonaceae	0.60	Reyes
<i>Hampea trilobata</i> Standl.	Malvaceae	0.70	promedio de la región
<i>Helicteres baruensis</i> Jacq.	Malvaceae	0.70	promedio de la región
<i>Heliocarpus donnell-smithii</i> Rose.	Tiliaceae	0.13	Erdoiza Sordo y Castillo Morales (1992)
<i>Heteropterys brachiata</i> (L.) DC.	Malpighiaceae	0.54	Sanapre
<i>Heteropterys laurifolia</i> (L.) A. Juss.	Malpighiaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Hintonia octomera</i> (Hemsl.) Bullock.	Rubiaceae	0.70	promedio de la región
<i>Hippocratea excelsa</i> Kunth.	Hippocrateaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Hiraea reclinata</i> Jacq.	Malpighiaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Hybanthus yucatanensis</i> Millps.	Violaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Jacquinia macrocarpa</i> Cav. ssp. <i>macrocarpa</i>	Theophrastaceae	0.61	promedio de la región
<i>Jatropha gaumeri</i> Greenm.	Euphorbiaceae	0.70	promedio de la región
<i>Karwinskia humboldtiana</i> (J. A. Schultes) Zucc.	Rhamnaceae	0.70	Reyes
<i>Krugiodendron ferreum</i> (Vahl) Urb.	Rhamnaceae	0.91	Correa Méndez (2006)

---

---

<i>Laetia thamnia</i> L.	Salicaceae	0.66	Chave <i>et al.</i> , 2003
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit.	Fabaceae	0.56	Reyes
<i>Lonchocarpus hondurensis</i> Benth.	Fabaceae	0.67	Torelli (1982)
<i>Lonchocarpus longistylus</i> Pittier.	Fabaceae	0.80	promedio género
<i>Lonchocarpus rugosus</i> Benth.	Fabaceae	0.91	Tamarit Urias (1996)
<i>Lonchocarpus xuul</i> Lundell	Fabaceae	0.76	Sanapre
<i>Lonchocarpus yucatanensis</i> Pittier.	Fabaceae	0.80	promedio género
<i>Luehea candida</i> Mart.	Malvaceae	0.91	Barajas, 1987
<i>Luehea speciosa</i> Willd.	Malvaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Lysiloma latisiliquum</i> (L.) Benth.	Fabaceae	0.45	Sanapre
<i>Macfadyena unguis-cati</i> (L.) A. H. Gentry.	Bignoniaceae	0.51	promedio de la región
<i>Machaonia lindeniana</i> Baillon.	Rubiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Malmea depressa</i> (Baillon) R. E. Fr.	Annonaceae	0.70	promedio de la región
<i>Malpighia glabra</i> L.	Malpighiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Malpighia sp</i> L.	Malpighiaceae	0.65	promedio género
<i>Manihot aesculifolia</i> (Kunth) Pohl.	Euphorbiaceae	0.65	promedio género
<i>Mansoa verrucifera</i> (Schltdl.) A. H. Gentry.	Bignoniaceae	0.50	Sanapre
<i>Mimosa bahamensis</i> Benth.	Fabaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Montanoa atriplicifolia</i> (Pers.) Sch. Bip.	Asteraceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Neea psychotrioides</i> Donn. Sm.	Nyctaginaceae	0.26	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Neea sp.</i>	Nyctaginaceae	0.70	promedio de la región

---

<i>Neomillspaughia emarginata</i> (Gross) Blake.	Polygonaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Otopappus guatemalensis</i> (Urb.) R.L. Hartman & Stuessy.	Asteraceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Otopappus scaber</i> S. F. Blake.	Asteraceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Parathesis cubana</i> (A. DC.) Molinet & M. Gómez.	Myrsinaceae	0.62	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Parmentiera millspaughiana</i> L.O. Williams.	Bignoniaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Phyllanthus acuminatus</i> Vahl.	Phyllanthaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Piscidia piscipula</i> (L.) Sarg.	Fabaceae	0.59	Reyes-García et al 2012
<i>Pisonia aculeata</i> L.	Nyctaginaceae	0.43	Sanapre
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	Fabaceae	0.71	Reyes
<i>Pithecoctenium crucigerum</i> (L.) A. H. Gentry.	Bignoniaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Platymiscium yucatanum</i> Standley.	Fabaceae	0.83	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Plumeria obtusa</i> L.	Apocynaceae	0.70	promedio de la región
<i>Psidium sartorianum</i> (O. Berg) Nied.	Myrtaceae	0.75	Sanapre
<i>Psychotria microdon</i> (D. C.) Urb.	Rubiaceae	0.65	promedio género
<i>randia longiloba</i> Hemsl.	Rubiaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Randia obcordata</i> S. Watson.	Rubiaceae	0.70	Reyes
<i>Randia truncata</i> Greenm. & C. H. Thomps.	Rubiaceae	0.77	promedio género
<i>Sabal yapa</i> C.Wright ex Becc.	Arecaceae	0.70	Reyes
<i>Samyda yucatenensis</i> Standl.	Salicaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Sapranthus campechianus</i> (Kunth) Standl.	Annonaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Schoepfia schreberi</i> J. F. Gmel.	Olacaceae	0.70	promedio de la región

---

<i>Securidaca diversifolia</i> (L.) S. F. Blake.	Polygalaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Senna atomaria</i> (L.) H. S. Irwin & Barneby.	Fabaceae	0.80	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Senna racemosa</i> (Mill.) H. S. Irwin & Barneby.	Fabaceae	0.62	Reyes
<i>Sideroxylon obtusifolium</i> (Roemer & Schultes) T. D. Penn.	Sapotaceae	0.77	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Solanum erianthum</i> D. Don.	Solanaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Spondias mombin</i> L.	Anacardiaceae	0.39	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Stizophyllum riparium</i> (Kunth) Sandwith.	Bignoniaceae	0.51	promedio lianas Sanapre
<i>Tabebuia chrysantha</i> (Jacq.) Nicholson ssp. <i>chrysantha</i> .	Bignoniaceae	0.94	Cárdenas Palominos (2002)
<i>Tabernaemontana alba</i> Mill.	Apocynaceae	0.45	Sanapre
<i>Talisia floresii</i> Standl.	Sapindaceae	0.84	Reyes <i>et al.</i> , 1992
<i>Talisia olivaeformis</i> (Kunth) Radlk.	Sapindaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Thevetia gaumeri</i> Hemsl.	Apocynaceae	0.70	Reyes
<i>Thouinia paucidentata</i> Radlk.	Sapindaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume.	Ulmaceae	0.11	Erdoiza Sordo y Castillo Morales (1992)
<i>Trichilia glabra</i> L.	Meliaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Vitex gaumeri</i> Greenm.	Verbenaceae	0.56	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Ximenia americana</i> L.	Olacaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Zanthoxylum caribaeum</i> Lam.	Rutaceae	0.76	Chave <i>et al.</i> , 2006
<i>Zapoteca formosa</i> (Kunth) H. Hern. ssp. <i>formosa</i> .	Fabaceae	0.64	Promedio total en este estudio
<i>Zuelania guidonia</i> (Sw.) Britton & Millsp.	Salicaceae	0.58	Reyes

---