



Solutions for environment and development
Soluciones para el ambiente y desarrollo

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
ESCUELA DE POSGRADO

**Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en
regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus
oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. en el norte del Estado
de Chiapas, México**

Por

Mequeas González Zárate

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de


Magister Scientiae en Manejo y Conservación de
Bosques Naturales y Biodiversidad

Turrialba, Costa Rica, 2008

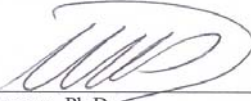
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por el Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del Estudiante como requisito parcial para optar por el grado de:

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y CONSERVACIÓN
DE BOSQUES TROPICALES Y BIODIVERSIDAD**

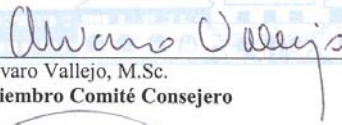
FIRMANTES:



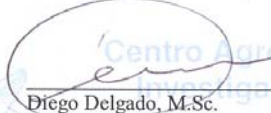
Fernando Casanoves, Ph.D.
Consejero Principal



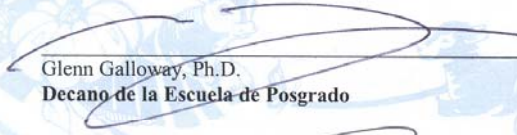
Carlos Navarro, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Alvaro Vallejo, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Diego Delgado, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Glenn Galloway, Ph.D.
Decano de la Escuela de Posgrado



Mequeas González Zarate
Candidato

DEDICATORIA

A mis padres con todo mi cariño, porque cuando de niño en el camino me tomaban de su mano, casi el doble que la mía y cuando ellos daban un paso yo tenía que dar dos, entonces me levantaban para abrazarme y desde arriba podía ver mejor...

Juan y Alipia

Con todo el cariño y amor que nació para formar mi pequeña familia y por esperarme durante todo este tiempo, con la esperanza de reunirnos muy pronto:

Shamna, Víctor Hugo e Hilda

Con el infinito amor familiar por compartir las tristezas y alegrías, pero sobre todo por el espíritu de mantenernos siempre unidos:

Eymard, Dora, Eymar K. Juan Jesús e Ixtac; Jere, Carmen, Irazú y Jere; Libo, Mary (QED), Zule y Jhosita; Julio, Eva, Jazmin y Hannis; Chayo, Emma, Jeidy y Pedrito; Checo, Lety y Carlita; Vin, Adriana y Metzii

A la familia *García Valenzuela* por todas las muestras de apoyo incondicional que nos han brindado, muchas gracias.

A las familias *García Jiménez, Santiago Hernández y Castillo Jiménez* por formar parte de mí, al recibir todas sus muestras de apoyo y de convivencia.

A las familias *Luría Mariscal y Pacheco Reyes* por su amistad incondicional que ha nacido para convivir y disfrutar las alegrías que la vida nos da.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a la Fundación Ford, mediante su programa (*Ford Foundation International Fellowship Program*) por el financiamiento recibido para el desarrollo de mi posgrado y por formar parte de la red de becarios, muchas gracias.

Al Instituto Internacional de Educación (IIE) por el seguimiento y por todos los apoyos de logística recibidos en mi programa de posgrado.

Al Centro de Investigaciones Superiores en Antropología Social (CIESAS), por la preparación preacadémica y relaciones humanas para abordar con profesionalismo un programa de posgrado.

Al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), por brindarme el espacio para mi fortalecimiento académico y profesional.

A mi profesor consejero, el Dr. Fernando Casanoves, por apoyarme en todo el proceso académico de la investigación y por todos los aportes científicos recibidos.

Con mucho afecto al M.Sc. Álvaro Vallejo, por su amabilidad, por compartir sus aportes y conocimientos en el presente trabajo.

Al Dr. Carlos Navarro, por formar parte de mi comité de asesores y por la revisión profesional del documento.

Al M.Sc. Diego Delgado, por su disponibilidad en la revisión detallada del documento y formar parte de mi comité de asesores.

Al Instituto Tecnológico Agropecuario de Oaxaca No 23, ahora (ITVO), por brindarme un espacio para mi desempeño profesional.

Al M. C. Guadalupe García Jiménez, por brindarme su apoyo, amistad y confianza para mi desempeño profesional en el ITAO 23.

Al Dr. Salvador Lozano Trejo, por todo el apoyo recibido para desempeñar funciones en docencia y por colaborar en su equipo de trabajo durante sus funciones en el ITAO 23.

A la Comisión Forestal Sustentable del Estado de Chiapas (COFOSECH), en representación del Biol. Froilán Esquinca Cano, y al Ing. José Federico Sánchez Sámano, por brindarme su apoyo para el desarrollo del trabajo en campo.

Al equipo de Servicios Técnicos Forestales, en representación el Ing. Bonifacio Flores González, por todo el apoyo recibido durante la fase de campo, sinceramente muchas gracias.

Al ejido Coapilla, Mezcalapa, Chiapas, en representación el Comisariado Ejidal Sr. Rutilo por brindarme todo el apoyo para la realización del trabajo de campo.

A los Sr. Moisés Estrada, jefe de producción y fomento forestal del ejido Coapilla y al Sr. Eymard González, por apoyarme en todo momento en el levantamiento de la información de campo.

A mis compañeros de trabajo: José Cristóbal Leyva, Alfonso de la Fuente, Rodolfo A. Hernández, Gerardo Rodríguez, Ernesto Hernández y a toda la comunidad ITAO, que constantemente se desempeñan para fortalecer esta digna institución.

A mis apreciables amigos: *Celestino Flores, José Antonio Guillen, Juan Jarkín, C. Ivett García, Rubén Aragón, Eloy Fernández, Magda Mendoza, Aidé García, Shenia Sima, Raquel Rodas, Adina Chain, Ana Vera, Ariel Gómez* y a la familia mexicana en CATIE por compartir y disfrutar momentos agradables, en estos dos años que se fueron volando.

A mis apreciables compañeros de la generación 2007 – 2008 por compartir momentos académicos y joviales en este espacio cosmopolita.

A todos, porque la lista puede continuar y me llevaría un documento igual al que ahora presento para agradecer con detalle cada momento de mi vida, sin embargo sea este trabajo un pequeño detalle para recordarlos.

¡Muchas Gracias!

BIOGRAFÍA

El autor nació en San Pedro Tepalcatepec, Yautepec, Oaxaca el 11 de junio de 1974. El interés por el manejo y la conservación de los recursos naturales lo llevó a desarrollar sus estudios en ingeniería forestal en la Universidad de Autónoma Agraria “Antonio Narro” de Saltillo, Coahuila, México, graduándose en el año 2000.

A partir del 2001 labora en el Instituto Tecnológico Agropecuario de Oaxaca (ITAO 23) actualmente Instituto del Valle de Oaxaca (ITVO) como docente en la carrera de Ingeniería Forestal. También ha participado en el desarrollo de proyectos de para promover el manejo sustentable de los recursos forestales en comunidades de Oaxaca y Chiapas, México bajo los apoyos otorgados por la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

En el 2006 fue seleccionado por la Fundación Ford en su programa (*Ford Foundation International Fellowship Program*) para obtener una beca para desarrollar un programa de posgrado y fortalecimiento profesional.

Ingresó al programa de estudios de posgrado del CATIE en enero de 2007, en la maestría de Manejo y Conservación de Bosques Tropicales y Biodiversidad, graduándose en el 2008. Ahora presenta a ustedes este trabajo de investigación sobre biomasa y carbono esperando sea de utilidad.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
BIOGRAFÍA	VI
CONTENIDO.....	VII
RESUMEN	X
SUMMARY	XI
ÍNDICE DE CUADROS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS	XVI
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS	XVI
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos del estudio	2
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	2
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
2 MARCO CONCEPTUAL	4
2.1 Antecedentes de la problemática ambiental.....	4
2.2 El papel de los ecosistemas boscosos en el ciclo global del carbono	5
2.3 Relevancia de los estudios de captura de carbono en los ecosistemas forestales	6
2.4 Biomasa	7
2.5 Ciclo del carbono	8
2.6 Cuantificación de biomasa y carbono en bosques naturales.....	9
2.7 Métodos para calcular biomasa.....	10
2.8 Estimación de biomasa y carbono mediante modelos alométricos.....	10
2.8.1 <i>Criterios para la selección de modelos</i>	12
2.9 Factor de expansión de biomasa	12

2.10	Descripción de las especies de estudio	13
2.10.1	<i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore	13
2.10.2	<i>Pinus oocarpa</i> var <i>ochoterenai</i> Mtz.....	14
2.10.3	<i>Quercus</i> sp.	15
2.10.4	Índices de sitio	16
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
3.1	Localización del área de estudio	18
3.1.1	Clima.....	18
3.1.2	Hidrología.....	18
3.1.3	Geología y edafología.....	20
3.1.4	Tipos de vegetación	20
3.2	Diseño de muestreo y toma de la información	22
3.2.1	Sistema de muestreo.....	22
3.2.2	Medición de variables dendrométricas.....	22
3.3	Cálculo de biomasa arriba del suelo	23
3.3.1	Volumen del fuste.....	23
3.3.2	Determinación de la densidad de la madera	24
3.3.3	Densidad de ramas y follaje	25
3.3.4	Cálculo de componentes y biomasa total	25
3.3.5	Factor de expansión de biomasa	27
3.3.6	Cálculo de carbono arriba del suelo	28
3.3.7	Validación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa	28
3.3.8	Estimación de biomasa total por hectárea mediante intervalos de confianza .	29
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
4.1	Biomasa aérea en árboles individuales	30
4.1.1	Densidad de la madera.....	32
4.1.2	Factor de expansión de biomasa	33

4.2	Modelos alométricos para la estimación de biomasa total	34
4.2.1	<i>Biomasa total para Pinus maximinoi</i>	34
4.2.2	<i>Biomasa total para Pinus oocarpa</i>	37
4.2.3	<i>Biomasa total para Quercus sp.</i>	40
4.3	Biomasa de componentes para las tres especies estudiadas	44
4.3.1	<i>Biomasa en componentes para Pinus maximinoi</i>	44
4.3.2	<i>Biomasa en componentes para Pinus oocarpa</i>	46
4.3.3	<i>Biomasa en componentes para Quercus sp.</i>	50
4.4	Biomasa total y carbono almacenado en rodales de pino – encino	53
4.4.1	<i>Biomasa en rodales con predominancia de Pinus maximinoi</i>	53
4.4.2	<i>Estimación de biomasa total por hectárea mediante modelos alométricos en rodales de Pinus maximinoi</i>	57
4.4.3	<i>Biomasa en rodales con predominancia de Pinus oocarpa</i>	59
4.4.4	<i>Estimación de biomasa total por hectárea mediante modelos alométricos en rodales de Pinus oocarpa</i>	63
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
6	BIBLIOGRAFÍA	68
	ANEXOS.....	78
	Anexo I: Características fisicogeográficas y ecológicas para la estimación de la biomasa arriba del suelo.....	79
	Anexo II: Levantamiento de la Información dendrométrica de la parcela de 1000 m ²	80
	Anexo III. Rangos ambientales para la aplicación de los modelos alométricos generados para la estimación de biomasa total y por componentes en el ejido Coapilla Chiapas, México.	81

RESUMEN

Los escasos estudios sobre biomasa y carbono almacenado en ecosistemas templados fríos han promovido el interés por fomentar la investigación sobre este tema, basada en experiencias obtenidas en otras investigaciones, sobre todo en ecosistemas tropicales y en plantaciones forestales que es en donde más se ha escrito al respecto. El presente estudio tiene el objetivo de estimar la biomasa y el carbono almacenado en tres especies de clima templado frío: *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. Estas especies son dominantes en los bosques del ejido Coapilla, Chiapas, México.

Mediante un sistema de muestreo dirigido en parcelas temporales de muestreo (PTM) con superficie de 1000 m², se evaluaron dos tipos de rodales, uno con predominancia de *Pinus maximinoi* y otro con predominancia de *Pinus oocarpa*, en ambos casos asociadas con *Quercus* sp. Se realizó la cuantificación directa de la biomasa en componentes (fuste, ramas y follaje) de *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa* y *Quercus* sp. De cada especie se obtuvieron muestras de madera para determinar la densidad básica de la madera y por su intermedio la biomasa a través del volumen.

A partir de los resultados obtenidos de biomasa total y por componentes se generaron modelos alométricos en función de variables como el diámetro normal, altura total en pie, altura al inicio de la copa y diámetro de copa. Para cada una de las especies se presentan varios modelos. Los coeficientes de determinación R² obtenidos para los distintos modelos estuvieron entre 0.95 a 0.99. Los Criterios de Información de Acaike (AIC) y Criterio Bayesiano de Swart (BIC) también fueron usados para la selección de los mejores modelos. Los rodales con predominancia de *Pinus maximinoi* almacenaron 161.97 Mg/ha de biomasa y 81 Mg/ha de carbono. Los rodales con predominancia de *Pinus oocarpa* fijaron 142.23 Mg/ha de biomasa y 71 Mg/ha de carbono.

SUMMARY

Few studies on biomass and carbon stored in cold temperate ecosystems, have encouraged research on this topic based on experiences obtained from other research mainly on tropical ecosystems and forest plantations, from which more written papers have been derived. The purpose of this research was to estimate biomass and carbon stored in three species found in cold temperate climates: *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. and *Quercus* sp. These are dominant species at the Coapilla cooperative forest lands in Chiapas, México.

Two types of stands were evaluated using a sample system employed on temporary sampling plots (TSP) with areas of 1000 m², one with predominance of *Pinus maximinoi* and the other with predominance of *Pinus oocarpa*, both associated with *Quercus* sp. A direct biomass components (stem, branches and forage) quantification was conducted on *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa* and *Quercus* sp. Wood samples were taken from each species to determine basic wood density and through it biomass by volume.

The results obtained from total biomass and by its components were used to generate allometric models in accordance with variables such as normal diameter, total standing height, height at crown and crown diameter. Several models were presented for each of the species. The R² determination coefficients obtained for the different models ranged between 0.95 and 0.99. AIC and BIC criteria were also employed to select the best models. Stands with predominance of *Pinus maximinoi* were stored at 161.97 mg/ha biomass and 81 mg/ha carbon. Stands with predominance of *Pinus oocarpa* were fixed at 142.23 mg/ha biomass and 71 mg/ha carbon.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Patrón de uso del suelo en México y sus reservorios de carbono en 1990	6
Cuadro 2. Fórmulas dendrométricas para el cálculo del volumen de fuste	24
Cuadro 3. Medias de resumen de las variables consideradas en la medición de árboles individuales de las tres especies de estudio.....	30
Cuadro 4. Medias de resumen de la densidad de la madera para las tres especies de estudio .	32
Cuadro 5. Medidas de resumen del cálculo del factor de expansión de biomasa para las tres especies estudiadas.....	34
Cuadro 6: Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa total para <i>Pinus maximinoi</i>	36
Cuadro 7. Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa total para <i>Pinus oocarpa</i>	39
Cuadro 8. Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa total para <i>Quercus</i> sp.....	41
Cuadro 9: Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa de componente para <i>Pinus maximinoi</i>	45
Cuadro 10. Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa de componente para <i>Pinus oocarpa</i>	49
Cuadro 11. Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa total para <i>Quercus</i> sp.....	53
Cuadro 12. Límites de intervalos de confianza para la estimación promedio por hectárea de biomasa total en radales con dominancia de <i>Pinus maximinoi</i>	55

Cuadro 13. Especies principales presentes en las 79 parcelas que aportan más del 97% de la cantidad de biomasa acumulada.....	55
Cuadro 14. Ecuaciones de mejor ajuste presentadas para la estimación de biomasa total por hectárea en función de variables dendrométricas en rodales de <i>Pinus maximinoi</i>	57
Cuadro 15. Límites de intervalos de confianza para la estimación de biomasa total por hectárea en rodales con dominancia de <i>Pinus oocarpa</i>	61
Cuadro 16. Especies principales presentes en las 79 parcelas que aportan más del 99.3 % de la cantidad de biomasa acumulada.....	62
Cuadro 17. Ecuaciones presentadas para la estimación de biomasa total por hectárea en función de variables dendrométricas en rodales de <i>Pinus oocarpa</i>	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplares de regeneración natural de <i>Pinus maximinoi</i> H. E. Moore.....	13
Figura 2. Ejemplar de un árbol dominante de <i>Pinus oocarpa</i> , en el ejido Coapilla Chiapas ...	15
Figura 3. Localización general del área de estudio, ejido Coapilla, Chiapas	19
Figura 4. Estrategias de manejo de los recursos naturales y ordenamiento territorial para el ejido Coapilla, Chiapas. Tomado de González et ál. (2006).....	21
Figura 5. Esquema de la parcela de muestreo para el levantamiento de la información en campo.	23
Figura 6. Frecuencia de la distribución diamétrica para: a) <i>Pinus maximinoi</i> H. E Moore, c) <i>Pinus oocarpa</i> var <i>Ochoterenai</i> y d) <i>Quercus</i> sp.....	31
Figura 7. Relación alométrica de biomasa total con respecto al diámetro construido para <i>Pinus maximinoi</i>	36
Figura 8. Relación alométrica de biomasa total en función del dap para <i>Pinus oocarpa</i>	39
Figura 9. Relación alométrica de biomasa total en función del diámetro <i>Quercus</i> sp.	43
Figura 10. Arquitectura de <i>Pinus maximinoi</i>	44
Figura 11. Arquitectura de <i>Pinus oocarpa</i>	47
Figura 12. Arquitectura de <i>Quercus</i> sp.....	51
Figura 13. Rodal con dominancia de <i>Pinus maximinoi</i>	54
Figura 14. Relación alométrica de biomasa por hectárea en función del área basal para rodales de <i>Pinus maximinoi</i>	59
Figura 15. Estructura vertical y horizontal de un rodal con dominancia de <i>Pinus oocarpa</i>	60

Figura 16. Relación alométrica de biomasa por hectárea en función del área basal para rodales de *Pinus oocarpa*..... 65

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

Las abreviaturas que en este estudio se utilizan, están basadas en la nomenclatura y en el lenguaje común en la silvicultura y manejo forestal, además de ser ampliamente utilizadas en el sector forestal con la finalidad de manejo de la información a nivel de árboles individuales y de rodales.

Variables utilizadas a nivel de árbol	
Variable	Descripción
dap	Diámetro del árbol a una altura de 1,3 m por encima del suelo
g	Área basal
htp	Altura total del árbol en pie
htd	Altura total del árbol derribado
hic	Altura donde aparece la primera rama
dcopa	Diámetro de copa
lcopa	Longitud de copa
edaños	Edad de los árboles
dtocon	Diámetro del tocón
htocon	Altura del tocón
pramas	Peso de las ramas
pfollaje	Peso del follaje

Variables utilizadas a nivel de rodal	
Variable	Descripción
D	Diámetro promedio a la altura del pecho
G	Área basal por hectárea
H	Altura promedio por hectárea
N	Número de árboles por hectárea
Pramas	Peso de las ramas
Pfollaje	Peso del follaje

1 INTRODUCCIÓN

Aunque los ecosistemas forestales contienen grandes cantidades de carbono que es almacenado en la biomasa aérea viva y muerta, así como en el suelo (Post et ál. 1982), las regiones tropicales presentan un proceso acelerado de cambio de uso del suelo de estos ecosistemas forestales a tierras de pastos y cultivos (FAO 1993). En 1989, la Organización de las Naciones Unidas comenzó a planear una Conferencia sobre Medio Ambiente y Desarrollo para discutir cómo alcanzar el desarrollo sostenible, fue así que en 1992 se llevó a cabo en Río de Janeiro, Brasil, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Ambiente y Desarrollo o Cumbre de la Tierra, momento máximo de soporte político para vincular las metas de desarrollo con la erradicación de la pobreza y la protección ambiental para alcanzar el desarrollo sostenible (FAO 2002).

De La Cumbre de la Tierra surgieron importantes logros adicionales como La Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo; la Agenda 21; la Convención sobre Diversidad Biológica (CDB); la Convención Marco sobre Cambio Climático; la Declaración de Principios para el Manejo, Conservación y Desarrollo Sostenible de todos los tipos de bosques y un convenio para combatir la desertificación, entre otros foros, acuerdos y convenciones (ONU 1992).

El uso de combustibles fósiles y tecnologías industriales obsoletas, el cambio de uso del suelo y la destrucción de millones de hectáreas forestales están provocando un aumento en la concentración de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera. De acuerdo con estimaciones de la comunidad científica, se requiere un esfuerzo global para reducir las emisiones, ya que de lo contrario, en el año 2100 las concentraciones de (CO₂) en la atmósfera podrían generar una variación de la temperatura de entre 1.1 y 6.4°C (FAO 2002). Entre las posibles consecuencias de este calentamiento global están la elevación de la temperatura de los océanos, la desaparición de glaciares, la elevación del nivel del mar, el aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climatológicos extremos (como sequías e inundaciones) debido a una mayor evaporación de agua, y superficies oceánicas más calientes. Este cambio afectaría severamente la disponibilidad de agua, la continuidad de los servicios ambientales que producen los ecosistemas, y tendría importantes efectos en las actividades humanas (IPCC 2007).

Según el Plan de Desarrollo 2007 del Gobierno mexicano, se estima que en 2002 México generó el equivalente a 643,183 millones de toneladas de CO₂, volumen que lo sitúa dentro de los 15 principales países emisores, con una contribución de alrededor de 1.5% de las emisiones globales. En lo que respecta a las fuentes responsables de emisiones, el 61% corresponde al sector energético, el 7% a los procesos industriales, el 14% al cambio de uso de suelo (deforestación), el 8% a la agricultura y el 10% a la descomposición de residuos orgánicos, incluyendo las plantas de tratamiento de aguas residuales y los rellenos sanitarios. Dentro del sector energético en particular, la generación de electricidad representa el 24% de las emisiones; el uso de combustibles fósiles en el sector manufacturero e industria de la construcción el 8%; el transporte el 18%; los sectores comercial, residencial y agrícola el 5%; y las emisiones fugitivas de metano durante la conducción y distribución del gas natural, otro 5% (SEMARNAT 2007).

México implementará políticas y acciones tendientes a disminuir los efectos del cambio climático, fomentando la eficiencia en la generación y el uso de energía, utilizando energías renovables y tecnologías de bajas emisiones en los procesos industriales y frenando la deforestación y reduciendo las emisiones de otros gases de efecto invernadero. Para esto se considera prioritario tener datos precisos acerca de flujos de carbono relacionados con la dinámica de uso de suelo, para conocer el balance general de emisiones de gases de efecto invernadero en el ámbito nacional. En este estudio se busca estimar la cantidad de carbono que es almacenada en la biomasa aérea en los bosques naturales de pino – encino para determinar la cantidad de carbono atmosférico almacenado en este tipo de ecosistemas que contribuyen a la mitigación del cambio climático.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Estimar la captura de carbono en la biomasa aérea en regeneración natural de *Pinus maximinoii* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz y *Quercus* sp. para contribuir al conocimiento sobre almacenaje de carbono en Chiapas, México.

1.1.2 Objetivos específicos

Generar modelos para los distintos componentes de la biomasa aérea de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz y *Quercus* sp.

Generar factores de expansión de biomasa aérea para *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz y *Quercus* sp.

Predecir mediante modelos alométricos la biomasa aérea de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp.

Estimar la biomasa total a nivel de parcelas de regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore y *Pinus oocarpa*.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Antecedentes de la problemática ambiental

La problemática ambiental que enfrentan las naciones es cada vez más compleja debido al desequilibrio creciente entre el crecimiento de la población y la capacidad de los recursos para sustentar el aumento en la demanda de servicios ecosistémicos. El cambio climático en los últimos años es uno de los temas más importantes de la comunidad internacional en materia ambiental. La concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) ha ido en aumento, generando desde el siglo pasado evidencias científicas que argumentan que si el incremento de los GEI continua, los efectos cada vez serán significantes para el cambio del clima, y como consecuencia para un desequilibrio en el sistema (IPCC 2007).

El CO₂ es uno de los elementos más importantes en los GEI, generado por la actividad humana cuando se utilizan combustibles fósiles para la generación de energía y para satisfacer otras demandas requeridas por la sociedad. Los procesos de deforestación y cambios de uso del suelo se suman a este efecto; las concentraciones de metano generadas por actividades agrícolas contribuyen también al cambio climático (UNEP 2001). El aumento de la concentración de GEI en la atmósfera ha provocado el fenómeno de efecto invernadero generando cambios en las escalas climáticas de la tierra (IPCC 2007).

En 1972, 113 naciones se reunieron para la Conferencia de Estocolmo sobre el ambiente humano y la primera reunión sobre medio ambiente. En 1983, la Organización de las Naciones Unidas crea La Comisión Mundial sobre Ambiente y Desarrollo, conocida como la Comisión Brundtland (FAO 2002). En 1988, el Programa de Naciones Unidas para el Ambiente (PNUMA) creó el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). Dos años más tarde, la Asamblea General de las Naciones Unidas estableció el Comité Intergubernamental de Negociaciones y Convenio (CIN). En junio del mismo año, durante la Conferencia de las Naciones Unidas para el Ambiente y desarrollo (CNUMAD), 165 países firmaron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), basándose en principios y mecanismos para la reducción de GEI en la atmósfera a un nivel que impida interacciones antrópicas en el sistema climático. Este convenio entró en vigor el 21 de marzo de 1994 con la ratificación de 50 países (UNFCCC 1998, UNEP 2001).

Con la aprobación en 1997 del protocolo de Kioto (Japón) se establecieron las bases para desarrollar el mercado de carbono a nivel internacional como instrumento legal para reducir las emisiones de GEI en los países más industrializados bajo la normatividad de CMNUCC. Los países más desarrollados se comprometieron a reducir sus emisiones en un 5% con respecto a las generadas en 1990 y a evaluar los resultados en el período 2008 – 2012 (OCIC 1998). El protocolo estableció el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) para permitir a los países que más contaminan financiar proyectos que eviten emisiones de GEI en países en vías de desarrollo, a través de un mercado internacional de emisiones certificadas que les permita cumplir los compromisos ante la CMNUCC (OCIC 1998).

2.2 El papel de los ecosistemas boscosos en el ciclo global del carbono

En México, los bosques de coníferas y latifoliadas ocupan el 15.4% del territorio nacional. En el estado de Chiapas, la superficie forestal de bosques latifoliados incluyendo las coníferas representa 1.117,248 ha, la de selvas 2.175,948 ha (SARH-SFF 1994).

Los ecosistemas forestales son un reservorio considerable de carbono y contienen más del 80% del carbono global de la superficie. Sin embargo, cuando los bosques están maduros no ocurre asimilación neta de carbono, debido a que se encuentran saturados. En México, los bosques manejados cubren una superficie de 7.3 millones de ha, en tanto que los bosques protegidos cubren una superficie de 7.1 millones de ha. Por otro lado cerca del 80% de las tierras forestales son de propiedad comunal y el 95% de los aprovechamientos forestales provienen principalmente de bosques templados nativos (Maser et ál. 2001).

Diversos estudios sobre captura de carbono han señalado el potencial que tienen los bosques de México en este sentido. Maser et ál. (2001) utilizaron un modelo para estimar la captura de carbono en el período 2000-2030, en el que se dividió el uso del suelo en varias clases (bosques, selvas, zonas áridas y usos no forestales). Los autores utilizaron dos escenarios diferentes: primero, un escenario de referencia y segundo, un escenario de "políticas". Sus resultados muestran que de adoptar las opciones propuestas, México tendría la posibilidad de capturar aproximadamente 46 millones de toneladas de C entre el año 2000 y el año 2030. Una parte de esta mitigación se lograría a través de: a) evitar la deforestación; b) manejar sustentablemente los bosques naturales; c) restaurar las áreas forestales degradadas y d) conservar los bosques protegidos. En el año 1990, se realizó el primer inventario nacional

de gases de efecto invernadero (GEI), donde se calcularon los reservorios de carbono de los diferentes ecosistemas forestales (Cuadro 1).

Cuadro 1. Patrón de uso del suelo en México y sus reservorios de carbono en 1990

Tipo de Ecosistema	Cobertura vegetal	Superficie (miles ha)	Densidad de carbono (Mg C ha ⁻¹)	Reservorio de carbono (GtC)*
Bosques Naturales	Bosques de coníferas	9,985	257	2.5
	Bosques latifoliados templados	8,409	236	1.9
	Selvas tropicales siempre verdes	5,717	305	1.7
	Selvas tropicales caducifolias	15,338	154	2.3
	Bosques semiáridos	62,840	80	5.0
	Bosques degradados	21,484	122	26
Plantaciones	Con rotación prolongada	3	191	0.0006
	Plantaciones de restauración	147	180	0.0265
Bosques manejados	Coníferas	6,444	234	1.5
	Selvas tropicales siempre verdes	900	309	0.28
Áreas protegidas	Templado	672	240	0.16
	Tropical siempre verde	1,765	305	0.54
	Tropical caducifolio	106	154	0.02
	Áreas pantanosas	303	282	0.09
	Bosques semiáridos	3,170	97	0.30
Otros Usos	Agricultura	25,939	89	2.3
	Pastizales	24,893	95	2.4
	Agroforestería	900	159	0.1

Fuentes: Masera et ál. (2001) y de Jong et ál. (2003).

* 1 GtC = 109 ton C.

2.3 Relevancia de los estudios de captura de carbono en los ecosistemas forestales

Los bosques, como fuentes de servicios ambientales, por su ubicación geográfica y a su vez por el entorno socioeconómico en que se encuentran, cada vez son más vulnerables debido a causas como los incendios forestales, tala ilegal, actividades de tipo antropogénica para la agricultura y la ganadería, que hasta en décadas pasadas su utilización se basaba en prácticas no sostenibles con el manejo de los recursos. Masera et ál. (2001) estiman que en México cerca de 20 millones de personas usan la leña como principal fuente energética para uso doméstico, causa importante en la producción de CO₂. Masera (1995) considera que el sector

forestal aporta casi el 40% de las emisiones totales de CO₂ y que el sector de generación de energía tiene la contribución más importante. La mitigación del cambio climático exige mantener niveles de CO₂ en la atmósfera por debajo de un cierto rango, que probablemente hayamos superado ya (IPCC 2007). Para reducir este nivel, es necesario capturar más CO₂ de la atmósfera y fijarlo en la biosfera mediante sumideros de carbono capaces de absorber más CO₂ del que se emite.

Los bosques, incluyendo las plantaciones forestales, cumplen un importante papel en el ciclo del carbono global, dado que gran parte de la biomasa está conformada por carbono (aproximadamente el 50%). La importancia de este papel ha sido reconocida por el Protocolo de Kioto (PK), en el marco del cual se permite el desarrollo de proyectos de remoción de carbono atmosférico en países que no tienen compromisos de reducciones, comúnmente conocidos como proyectos forestales bajo el Mecanismos para un Desarrollo Limpio (MDL). Por lo anterior, la estimación de carbono en estos proyectos es un aspecto de fundamental importancia, pues la unidad transferible en el mercado internacional del carbono es la reducción (o captura) de CO₂, medida en toneladas y comercializada en reducciones certificadas de emisiones (CERs, por sus siglas en inglés) (IPCC 2007).

2.4 Biomasa

De acuerdo con el IPCC (2001), la biomasa es considerada como la masa total de organismos vivos en una zona o volumen determinado; a menudo se incluyen los restos de plantas que han muerto recientemente (biomasa muerta). Por otra parte la FAO (1998) considera que la biomasa es un elemento principal para determinar la cantidad de carbono almacenado en el bosque. La biomasa forestal permite elaborar previsiones sobre el ciclo mundial del carbono, que es un elemento de importancia en los estudios sobre el cambio climático. Además, para una parte de la población humana que vive en las zonas rurales de los países en desarrollo, la biomasa es una fuente primordial de combustible para cocinar y para calefacción.

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que se derive de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintético. La energía de la biomasa deriva del material vegetal y animal, tal como madera de bosques,

residuos de procesos agrícolas y forestales, y de la basura industrial, humana o de animales (López et ál. 2003).

2.5 Ciclo del carbono

El ciclo del carbono es considerado como un conjunto de cuatro depósitos interconectados: la atmósfera, la biosfera terrestre (incluyendo los sistemas de aguas frescas), los océanos y los sedimentos (incluso los combustibles fósiles). Estos depósitos son fuentes que pueden liberar el carbono, o sumideros que son los que absorben carbono de otra parte del ciclo. Los mecanismos principales del intercambio del carbono son la fotosíntesis, la respiración y la oxidación (Ciesla 1996).

En general, las plantas absorben el CO₂ de la atmósfera a través de la fotosíntesis y este compone las materias primas como la glucosa, que participa en procesos fenológicos para la formación de componentes (flores, frutos, follaje, ramas y fuste) del árbol. Estos a su vez proporcionan elementos necesarios para su desarrollo y el crecimiento en altura, diámetro, área basal y diámetro de copa principalmente. El carbono se deposita en follaje, tallos, y sistemas radiculares y, principalmente, en el tejido leñoso de los troncos y ramas principales de los árboles. Estos componentes aportan materia orgánica al suelo y al degradarse dan origen al humus, que a su vez contiene CO₂. Por esta razón "los bosques son considerados importantes reguladores en el nivel de carbono atmosférico" (Hipkins 1984, Ordoñez 1998, 1999).

Los árboles actúan como sumideros de carbono y liberan oxígeno (O₂), reteniendo el carbono en la biomasa, principalmente en la madera. La madera contiene un 48% de lignina y celulosa; para almacenar una tonelada de carbono es necesario producir 2.2 toneladas de madera (FWPRDC 1996). Al quemarse la madera el proceso se revierte, usando el O₂ del aire y el carbono almacenado en la madera para liberar al final CO₂. Los bosques pueden ser sumideros pero también fuentes de carbono, esto dependerá de cómo y con qué propósito sean manejados y cómo sean utilizados sus productos (Chaturveni 1994).

2.6 Cuantificación de biomasa y carbono en bosques naturales

La estimación de la biomasa en los bosques es un tema relevante en relación con el problema del calentamiento global del planeta. En años recientemente se ha incrementado el interés por estudiar el papel de los bosques en los ciclos de elementos biogeoquímicos, especialmente del carbono (Delaney et ál. 1997), y su relación con los gases de efecto invernadero. Se parte del principio de que aproximadamente 50% de la biomasa estimada es carbono y, por tanto, puede ser adicionada a la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂) cuando este se corta y quema (Morrissey y Justus 1998).

En el ámbito internacional se han iniciado estrategias para la mitigación del calentamiento global como las negociaciones de créditos de carbono. Para hacer realidad estas estrategias en proyectos forestales es necesario medir y monitorear el carbono almacenado, especialmente en el compartimiento de biomasa arriba del suelo (aérea). Las ecuaciones de biomasa son las más utilizadas para estimar la captura de carbono en bosques, y como consecuencia se adoptan en la mayoría de las investigaciones relacionadas con cuantificación de biomasa en los bosques naturales (Higuchi et ál. 1998).

Existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa aérea de un bosque. El método directo consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente. Otra forma es calcular la biomasa aérea de manera indirecta a través de ecuaciones y modelos matemáticos obtenidos por análisis de regresión entre las variables colectadas en terreno y en inventarios forestales (Brown 1997). Este mismo autor estimó que la cantidad de carbono almacenado para diversos tipos de bosques naturales, secundarios y plantaciones forestales, casi en su totalidad asume el valor de la fracción de carbono en materia seca en un 50% para todas las especies en general.

Rodríguez et ál. (2006), desarrolló una investigación para cuantificar la cantidad de carbono almacenado en los bosques de niebla de la Reserva de la Biosfera “El Cielo”, en Tamaulipas, México. Mediante modelos no lineales estos autores mostraron que la especie *Liquidambar styraciflua* aportó más de 28.5 Mg/ha de biomasa, seguida de *Pinus montezumae* y *Quercus xalapensis* con más de 18.4 Mg/ha y, el estrato arbustivo, con diámetros entre 5 y 10 cm y con dominancia de tres especies, 13.5 Mg/ha.

Vidal et ál. (2001) realizaron un estudio sobre la estimación de biomasa en ramas y follaje en bosques naturales de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en Cuba, donde estimaron la cantidad de biomasa mediante modelos alométricos con un total de 169 árboles. Los resultados obtenidos indican que el dap explica el mayor porcentaje de la variabilidad de los datos y está más correlacionado con la cantidad de biomasa de ramas y follaje en árboles con un dap máximo de 47 cm (65 kg de biomasa en follaje y con 110 kg en ramas). A pesar de que la altura total estuvo relacionada con las variables de follaje y ramas, su aporte a los modelos probados no fue significativo

2.7 Métodos para calcular biomasa

Existen dos métodos para calcular el contenido de biomasa: el directo y el indirecto.

- **Método directo:** es denominado también método destructivo y consiste en medir los parámetros básicos de un árbol (entre los más importantes el diámetro a la altura del pecho -dap, altura total, diámetro de copa y longitud de copa); derribarlo y calcular la biomasa pesando cada uno de los componentes (fuste, ramas y follaje).
- **Método indirecto:** éste método es utilizado cuando existen árboles de grandes dimensiones y en casos en los que se requiere conocer el carbono de un bosque sin necesidad de derribar los árboles. En éste método se cubica y estima el volumen de las trozas con fórmulas dendrométricas; el volumen total del fuste o de las ramas gruesas se obtiene con la suma de estos volúmenes parciales. Se toman muestras de madera del componente del árbol y se pesan en el campo, luego se calcula en el laboratorio los factores de conversión de volumen a peso seco, es decir, la gravedad específica verde y la gravedad específica seca o densidad básica en gramos por centímetro cúbico.

2.8 Estimación de biomasa y carbono mediante modelos alométricos

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que relacionan la biomasa con variables del árbol medibles en pie, tales como el dap, altura total y diámetro de copa, principalmente. Para el desarrollo de estos modelos es necesario realizar un muestreo destructivo de árboles. El tamaño de muestra debe ser definido de manera que el error de predicción del modelo resultante esté dentro de los rangos aceptados; en general, se estima que

se obtienen valores del error aceptables con tamaños de muestra mayores a 20 individuos distribuidos sobre todos los rangos diámetros (Vallejo et ál. 2007).

La biomasa total de cada individuo se obtiene mediante la suma de la biomasa de los distintos componentes del árbol. Una vez obtenida la biomasa total de los árboles muestreados se trata de obtener, mediante técnicas estadísticas, relaciones directas entre la biomasa total del árbol y las variables del mismo medidas en pie. Para el cálculo de biomasa viva con base en ecuaciones alométricas basta con diseñar un muestreo estadísticamente representativo en el que se midan las variables independientes de la ecuación alométrica seleccionada. Los datos finales pueden ser presentados por clase diamétrica (Vallejo et ál. 2007). Watzlawick et ál. (2001) desarrollaron algunas ecuaciones para calcular la biomasa total:

$$BT = \beta_0 * dap * \beta_1$$

$$BT = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * dap^2$$

$$BT = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_3 (dap^2 + h)$$

$$BT = \beta^1 + \beta^2 * dap + \beta^3 * dap^2 + \beta^4 (dap^2 * h)$$

$$BT = \beta_0 + \beta_1 * dap^2 + \beta_2 (dap^2 * h)$$

$$BT = \beta_0 + \beta_1 * dap + \beta_2 * h$$

$$BT = \beta_0 * dap * \beta_1 * hc$$

donde:

BT = Biomasa total

β_i = i-ésimo parámetro de regresión del modelo

dap = diámetro a la altura del pecho

h = altura del árbol

hc = altura comercial

Segura et ál. (1999), en dos áreas experimentales de la Tirimbina, Costa Rica, desarrollaron modelos para estimar la biomasa total y el carbono almacenado por árbol de siete especies tropicales, a partir de variables como dap , altura comercial y total, biomasa y volumen del fuste, probando modelos lineales (logarítmicos, cuadráticos y exponenciales).

El uso de modelos de simulación permite realizar las estimaciones de la dinámica de carbono de una manera más confiable y facilita la creación de escenarios alternativos a corto, mediano y largo plazo (Mohren y Goldewijk 1990).

2.8.1 Criterios para la selección de modelos

Para la selección del modelo es importante considerar elementos de decisión de estadística tales como el coeficiente de determinación (R^2), Cuadrado Medio del Error (CME), significancia de los parámetros evaluados y criterio de predicción de Mallows. En los modelos alométricos que contienen varias variables regresoras es importante considerar también medidas como el R^2 ajustado y las varianzas de los coeficientes de regresión (pueden indicar multicolinealidad). Además pueden usarse los criterios de bondad de ajuste de diferentes modelos como el de Akaike (AIC) y el de Schwarz (BIC) para comparar modelos ajustados.

Por otra parte también se utiliza el Índice de Furnival (IF) que sirve para comparar modelos con y sin transformación de variables, como por ejemplo logarítmicos. El IF en modelos sin transformar es igual al error estándar de la estimación. Entre más pequeño es el IF el modelo tiene mejor ajuste (Furnival 1961). Para la validación de modelos también es importante tomar en cuenta la prueba de supuestos como: prueba de normalidad y homogeneidad de varianzas (Chatterjee y Price 1991, InfoStat 2008).

2.9 Factor de expansión de biomasa

El factor de expansión de biomasa (FEB) es la relación que existe entre la biomasa del fuste y la biomasa total. El FEB es una herramienta útil cuando se quiere calcular la biomasa total del árbol y solo se conoce la biomasa del fuste. Diversos estudios han generado relaciones alométricas con FEB que varían de 1.3 hasta 2.5 dependiendo de la especie, la edad y el dap promedio del rodal (Husch 2001).

Estas diferencias en valores promedios pueden estar relacionadas con la variabilidad de las especies, densidad de las masas arboladas, o bien calculadas en plantaciones forestales. Estos resultados pueden variar según el grado de intervención del bosque; existe un menor FEB en bosques cerrados y menos alterados y mayor en bosques abiertos y con mayor alteración (Brown y Lugo 1982).

2.10 Descripción de las especies de estudio

2.10.1 *Pinus maximinoi* H. E. Moore

Los bosques de *Pinus maximinoi* H. E. Moore se distribuyen ampliamente en el centro y sur de México, desde el eje Neovolcánico transversal hasta Guatemala, Honduras, El Salvador y noreste de Nicaragua. Dichos bosques se ubican entre los 600 y 2800 msnm, principalmente en los sistemas montañosos. En bosques de pino o pino - encino en regiones de alta productividad, esta especie se comporta como pionera en claros de bosques húmedos subtropicales y bosques de niebla. En zonas bajas se desarrolla principalmente en asociación con *P. oocarpa* (Perry 1991).

Se caracteriza por tener fustes rectos de 20 hasta 45 m de alto; de 70 hasta 110 cm de dap, mostrando un grosor de corteza mayor en la parte baja del fuste que disminuye significativamente conforme aumenta en altura. La corteza es de color café grisáceo con placas y fisuras longitudinales. Las semillas son aladas de forma triangular, de color café oscuro y de 6 a 7 mm de longitud. Las alas son de forma articulada de 18 a 20 mm de longitud (Niembro 1986).



Figura 1. Ejemplares de regeneración natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore

A finales del siglo XX se comenzó a investigar el potencial de *P. maximinoi* con fines comerciales, desde entonces esta especie que se distribuye de forma natural en México y Centroamérica, reveló ser una alternativa para las plantaciones en diferentes países tropicales y subtropicales. Las primeras aproximaciones mediante ensayos de procedencia indican que esta especie es igual o más productiva que muchas otras especies de pino. Esto ha motivado la búsqueda y conservación de bosques naturales con la finalidad de salvaguardar la riqueza genética de esta especie (Arteaga y Pérez 2001).

2.10.2 *Pinus oocarpa var ochoterenai* Mtz.

Según Martínez (1948) *P. oocarpa* pertenece a la sección serotina, caracterizado por presentar conos simétricos con escamas que se abren en diferentes tiempos, ovoides o parcialmente ovoides, coloración ocre o café rojizo. Esta especie se desarrolla en altitudes desde los 200 hasta los 2300 msnm; se distribuye desde el noreste de México, latitud 27° N (Sierra Madre Occidental) en el estado de Sonora, hasta Guatemala, Honduras, El Salvador y el noreste de Nicaragua; forman la más importante y dominante cobertura forestal en Centroamérica. Frecuentemente por su distribución, es la especie más abundante en los bosques abiertos de encinares junto con *Pinus teocote*, *P. michoacana*, *P. montezumae* y *P. douglasiana*, mientras que para la zona del sureste mexicano se asocia con *Pinus maximinoi*. Estas especies guardan estrecha relación con el suelo y su productividad, ya que desempeñan funciones como la retención del suelo y el agua, la captura de bióxido de carbono y son hábitat para la fauna silvestre y proveen de alimento a la misma. Los productos forestales maderables derivados del aprovechamiento de estos bosques son madera sólida, leña y postes para cercas. Con respecto a los productos forestales no maderables, destaca la producción de resina, fuente económica para algunas regiones geográficas donde se distribuye (Martínez 1948, Mirov 1967 y Perry 1991). Las semillas de *Pinus oocarpa* presentan una forma triangular de color café oscuro y longitud entre 6 y 7 mm. En cuanto a sus alas, son de forma articulada, de color café oscuro y de 10 a 15 mm de largo (Niembro 1986).



Figura 2. Ejemplar de un árbol dominante de *Pinus oocarpa* en el ejido Coapilla Chiapas

2.10.3 *Quercus* sp.

En México, el género *Quercus* comprende entre 150 a 200 especies con una gran diversidad morfológica (Rezedowsky 1978). En los ecosistemas de clima templado frío, los encinares junto con los pinares conforman estructuras uniformes y asociaciones ecológicas que pueden existir en masas puras, mezcladas o bien asociadas con otras especies latifoliadas. Por lo general son árboles perennifolios o caducifolios con alturas de entre 3 hasta 25 m con diámetros de 20 hasta 50 cm, con copas amplias y redondeadas cuando su crecimiento es libre, con hojas coriáceas y rígidas (Nixon 1993).

El género *Quercus* forma parte de las especies de mayor importancia ecológica en los ecosistemas de pino – encino, por su distribución en los macizos montañosos de México, forman el principal componente fisonómico en estos ecosistemas, y son responsables de la aportación del mayor componente en términos de biomasa. Se presentan en un intervalo altitudinal entre los 1200 a 2800 m resguardando mayor diversidad de especies por su estructura de crecimiento (Rezedowsky 1978). Este género se distribuye en los bosques templados, tropicales y matorrales de climas secos del hemisferio norte (Nixon 1993).

En México, los encinares han recibido poca atención debido a que son consideradas especies forestales de poco potencial económico, debido a sus características físicas de la madera para su transformación industrial (Zavala 1990). Los bosques de encinares guardan un

potencial importante como fuente de servicios ambientales pero a su vez son más vulnerables al ser utilizados para la fabricación de carbón vegetal, además de que es una de las principales especies para la generación de energía en las comunidades rurales de México (Masera et ál. 1995).

2.10.4 Índices de sitio

La calidad de sitio es la suma de todos los factores que afectan la capacidad productiva del bosque; estos factores son de tipo climático, edáfico y biótico (Spurr y Barnes 1982). Los factores del sitio son variables ambientales que determinan la calidad del suelo y el potencial productivo del sitio para el crecimiento de las masas forestales; la clasificación de la calidad del sitio es de importancia para el manejo forestal, pues nos permite estimar a través de la edad vs. la altura, la calidad del suelo y como resultado, el incremento en área basal, volumen y biomasa del árbol (Herrera y Alvarado 1998).

Las características físicas y químicas del suelo de cada sitio influyen en la tasa de regeneración y crecimiento del bosque. La disponibilidad de nutrientes, la presencia o ausencia de elementos tóxicos, la permeabilidad, la presencia de capas compactadas y la profundidad pueden determinar el potencial productivo de un sistema forestal. Las propiedades químicas de los suelos al igual que el contenido de materia orgánica influyen en las propiedades físicas del suelo, especialmente sobre la estructura (Carmean 1975).

Algunos estudios relacionados con la determinación de la calidad de sitio en México, han sido abordados con la finalidad de determinar el potencial productivo del suelo para la aplicación de tratamientos silvícolas. Inicialmente determinaron la calidad de sitio para *Pinus patula* en la Sierra Norte de Oaxaca, con aportaciones para tratamientos silvícolas de acuerdo con la calidad de sitio como una forma cualitativa y cuantitativa para determinar el crecimiento del bosque (Castaños 1962). Zepeda y Rivero (1984) construyeron curvas anamórficas de índice de sitio, basadas en el método de la curva guía, haciendo énfasis en la aplicación para la clasificación de masas arboladas de acuerdo con el potencial productivo del suelo.

Aguirre y Zepeda (1985) realizaron una investigación sobre la estimación de calidad de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., en la región de Iturbide, Nuevo León, con la finalidad de poder clasificar rodales coetáneos, conforme con su potencial productivo. Para ello

utilizaron datos provenientes de análisis troncales de 72 árboles dominantes. Utilizaron modelos matemáticos para ajustar los datos; el modelo seleccionado fue Richards modificado para construir un sistema de curvas polimórficas con intervalos de tres metros de altura a una edad base de 50 años. De la fuente (1998) elaboró una investigación relacionada con el crecimiento y predicciones del rendimiento de rodales coetáneos de *Pinus rudis* Endl. de Pueblos Mancomunados, Ixtlán, Oaxaca, destacando la importancia de métodos y técnicas, analíticas y cuantitativas, para evaluar y predecir el crecimiento e incremento de rodales coetáneos, haciendo énfasis en este tipo de trabajos enfocado como herramientas técnicas que dan soporte al manejo forestal. En trabajos de investigación destaca la información dasométrica proveniente de 159 parcelas temporales de muestreo, generando a través de la técnica de regresión por pasos, una ecuación que explica el 79% de la variación total observada en el índice de sitio donde se tomaron como puntos de referencia propiedades físicas y químicas del suelo.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio

El estudio se desarrolló en el municipio Coapilla, Chiapas, México, ubicado en las montañas del sureste mexicano, con una superficie de 6,108.20 ha de propiedad ejidal y estructura cultural de lengua zoque. Colinda al norte con los municipios de Ocoatepec, Tapalapa y Pantepec, al este con Bochil, al sur con Chicoasen y al oeste con Copainalá. Las coordenadas geográficas corresponden a 17° 07' 50" longitud norte y 93° 09' 30" longitud oeste, con una altitud promedio de 1630 msnm (Figura 3). El proceso de manejo y administración de sus recursos naturales se cimienta en la toma de decisiones a nivel de asamblea de 261 ejidatarios bajo la representación de sus autoridades municipales y ejidales. Los buenos resultados bajo este esquema de organización llamado "Unidad de Producción Forestal" los ha llevado a obtener reconocimientos institucionales por el adecuado manejo y aprovechamiento forestal en el estado de Chiapas.

3.1.1 *Clima*

Por localizarse en zona de influencia de los vientos alisios provenientes del Golfo de México, predomina un clima cálido húmedo Am (f), cálido subsúmedo Aw0(w) con lluvias de verano. En las partes más bajas orientadas hacia el suroeste, el clima es subhúmedo, desvaneciéndose hasta las selvas bajas caducifolias donde se torna más seco. La precipitación promedio anual en la zona de estudio reporta entre 1400 a 1600 mm. En los meses de mayo a octubre la temperatura mínima oscila entre los 9 y 21°C y máxima de 21 y 33°C, en los meses de noviembre–abril la temperatura mínima va de 6 a 18°C, y máximas de 18 a 30°C (García 1988).

3.1.2 *Hidrología*

La región de estudio está formada por una microcuenca, con altitudes que van desde los 500 hasta los 2200 msnm, cuyas aguas alimentan la subcuenca Chicoasén, y en menor proporción a las subcuencas del alto Grijalva, presa Nezahualcoyolt y Tzimbac de la cuenca Grijalva Villa Hermosa Tabasco. A la vez, nutren a los sistemas naturales que mantienen especies de flora y fauna acuática.

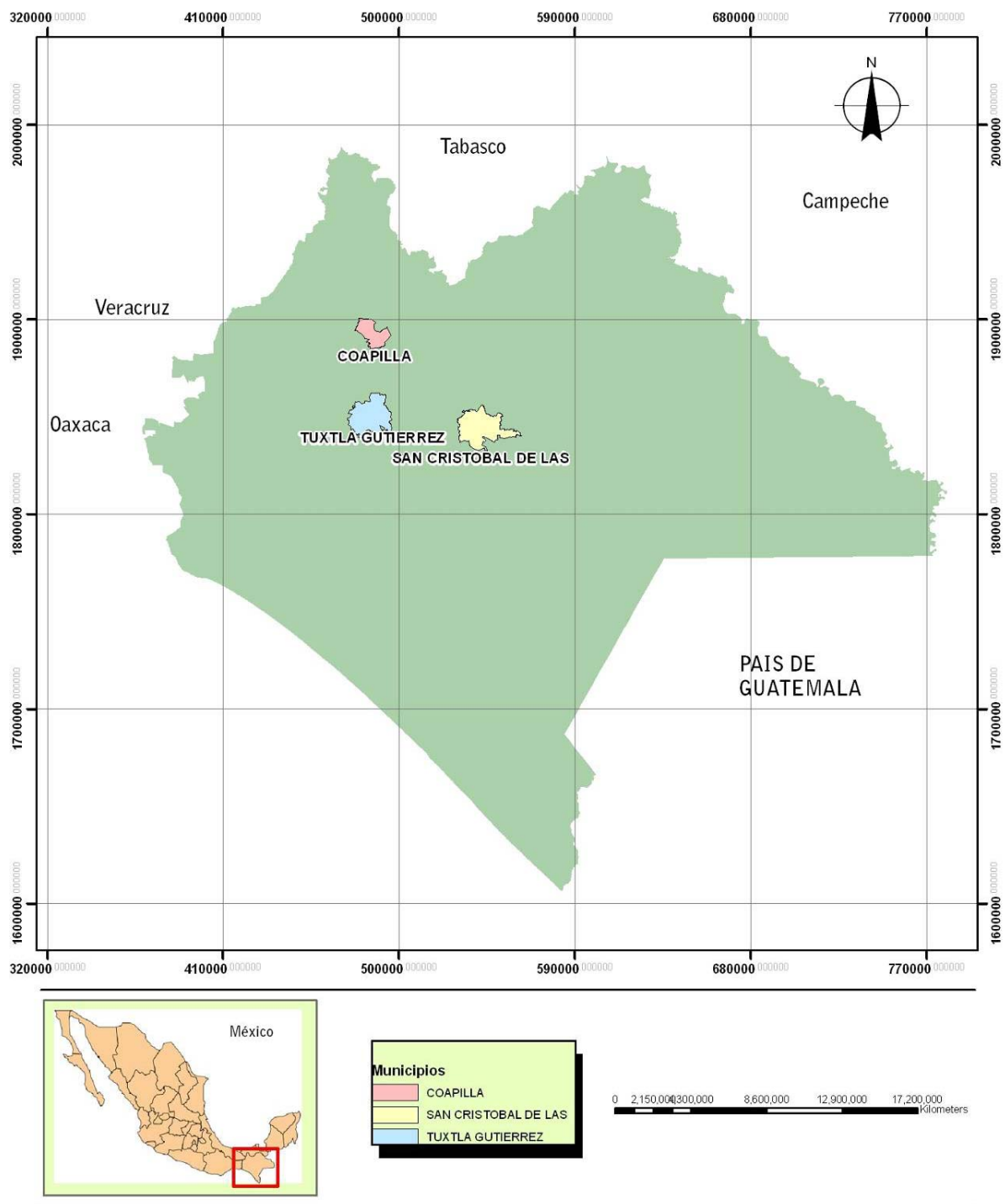


Figura 3. Localización general del área de estudio, ejido Coapilla, Chiapas

3.1.3 Geología y edafología

La zona presenta rocas sedimentarias calizas y lutitas, además de rocas ígneas extrusivas. Los suelos son originarios del cretácico superior, derivados de rocas sedimentarias compuestas por calizas, son de tipo litosol, luvisol, cambisol crómico y rendzina (INEGI 1984). La fertilidad de los suelos fue mejorada a raíz de la erupción del volcán “Chichonal” el 28 de marzo de 1982 que cubrió la zona con cenizas.

3.1.4 Tipos de vegetación

Los tipos de vegetación predominante están conformados por pino - encino, encinares, asociaciones entre pino – encino – liquidámbar. Entre las especies dominantes están *Pinus maximinoi*, *P. oocarpa*, *P. chiapensis*, *Liquidambar styraciflua*, *Arbutus xalapensis*, *Cornus disciflora*, *Inga aestuariorum* y *Cordia* sp. Las alturas de los pinares oscilan entre los 16 m en sitios de menor calidad, hasta los 45m en calidades de sitio muy ricos en materia orgánica, los cuales son propicios para el establecimiento de una alta diversidad de especies vegetales y animales. En espacios restringidos se presentan relictos de bosque mesófilo, donde resalta la presencia de *Liquidambar styraciflua*, *Persea* sp., *Clethra macrophylla* y escasos ejemplares de *P. chiapensis* (Rezedowsky 1988, Pennington 1998).

Por la diversidad y riqueza natural los bosques de esta región desempeñan un papel importante en la producción de bienes y servicios ecosistémicos, por la actividad fotosintética para la fijación de carbono atmosférico y la producción de biomasa, se logra revertir los niveles de CO₂ en la atmósfera por un lado, y por otro, la producción de agua que abastece a las presas de Chicoasén y Netzahualcóyotl generadoras de energía eléctrica para el sureste de México. Además forman parte del Corredor Biológico Mesoamericano como un espacio diverso en flora y fauna (SmartWood 2003).

Por la presencia de especies maderables, en la actualidad son aprovechados bajo un sistema de manejo forestal denominado método de desarrollo silvícola (MDS), con tratamientos intermedios de aclareos con la finalidad de redistribuir el volumen en árboles en pie, considerando como criterios de intervención la madurez del bosque, categorías diamétricas y densidad de la masa arbolada, para finalizar con una corta de regeneración denominada árboles padres (De la Fuente 1998). El esquema de manejo aplicado resulta hasta cierto punto rígido pues el método busca la ordenación del bosque hacia una estructura de

masas regulares formando bosques coetáneos con predominancia de pino. Bajo este contexto de manejo es importante considerar la diversidad de especies que también requieren manejo o bien áreas de conservación.

Por formar parte del Corredor Biológico Mesoamericano (CBM) se han planteado algunas iniciativas municipales para generar información sobre los recursos naturales con que cuenta el municipio. Los estudios generados tienen la finalidad de darle un mejor uso a sus recursos a corto, mediano y largo plazo, mediante aspectos de conservación y manejo de la biodiversidad como estrategia para mejorar los niveles de vida del ejido (Figura 4), a través de un Plan Municipal de Desarrollo Sustentable (PMDS) que considera la participación social como un eje estratégico para el manejo de la biodiversidad.

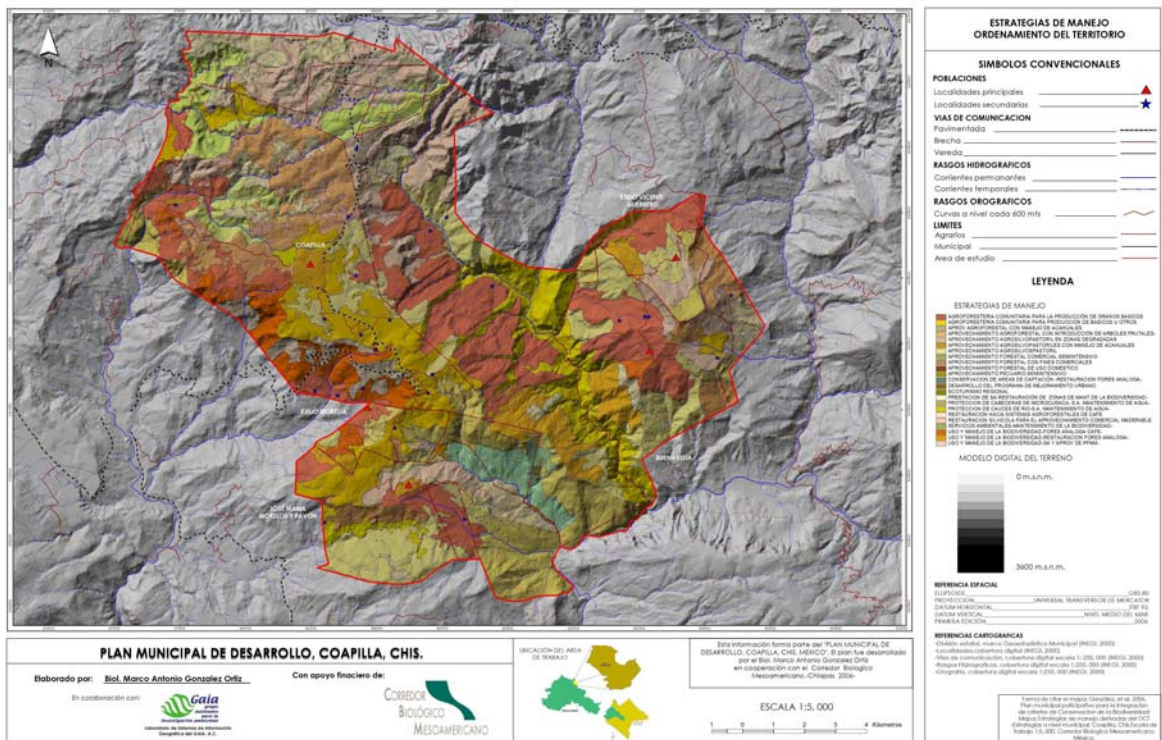


Figura 4. Estrategias de manejo de los recursos naturales y ordenamiento territorial para el ejido Coapilla, Chiapas. Tomado de González (2006).

3.2 Diseño de muestreo y toma de la información

3.2.1 Sistema de muestreo

Se trabajó con la información de los bosques naturales de pino – encino que en el pasado fueron sometidos a diferentes esquemas de manejo forestal, pero en la actualidad se encuentran bajo una modalidad de manejo forestal sostenible. Mediante un sistema de muestreo dirigido se tomó información ecológica y dendrométrica de los árboles en parcelas temporales de muestreo de 1000 m² de forma circular compensados por pendiente (Figura 5). En total se tomó información de 178 parcelas temporales (79 con predominancia de *P. maximinoi* y 79 con predominancia de *P. oocarpa*). Como centro de la parcela se tomó el árbol seleccionado a derribar; el número de árboles derribados fue de 92 para *P. maximinoi*, 91 para *P. oocarpa* y 44 para *Quercus* sp. Estos árboles fueron aprovechados por el ejido, se eligieron aquellos individuos libres de defectos como tallos secos, bifurcados, suprimidos u otras características que alteraran el crecimiento libre de los árboles. Los árboles seleccionados estuvieron dentro de las categorías de regeneración natural de brinzales con alturas de 30 cm hasta 2 m de altura, latizales con alturas de 2 m hasta 21 m y fustales jóvenes y maduros con alturas de 22 m hasta los límites de crecimiento en altura de los rodales estudiados tomando en cuenta las diferentes categorías diamétricas.

3.2.2 Medición de variables dendrométricas

Las mediciones realizadas antes y después de derribar los árboles seleccionados fueron: diámetro del árbol a una altura de 1.3 m por encima del suelo (dap) y diámetro y altura del tocón (dtocon), medidos con una forcípula de aluminio de 102 cm de largo marca Haglof; altura total del árbol en pie y derribado (htp) y (htd), altura de la primera rama (hic) y longitud de copa (lcopa); medidos con un clinómetro Brunton y Pistola Haga marca Germany; y diámetro de copa (dcopa) el cual se midió con una cinta métrica graduada en cm. La edad de los árboles (edaños), se estimó con un taladro de pressler marca Mora Sweden; el peso de las ramas (pramas kg) y el peso del follaje (pfollaje kg) se obtuvieron con una báscula marca Germany graduada a 1 kg y el volumen del fuste (vol m³) se obtuvo por cubicación con formulas matemáticas.

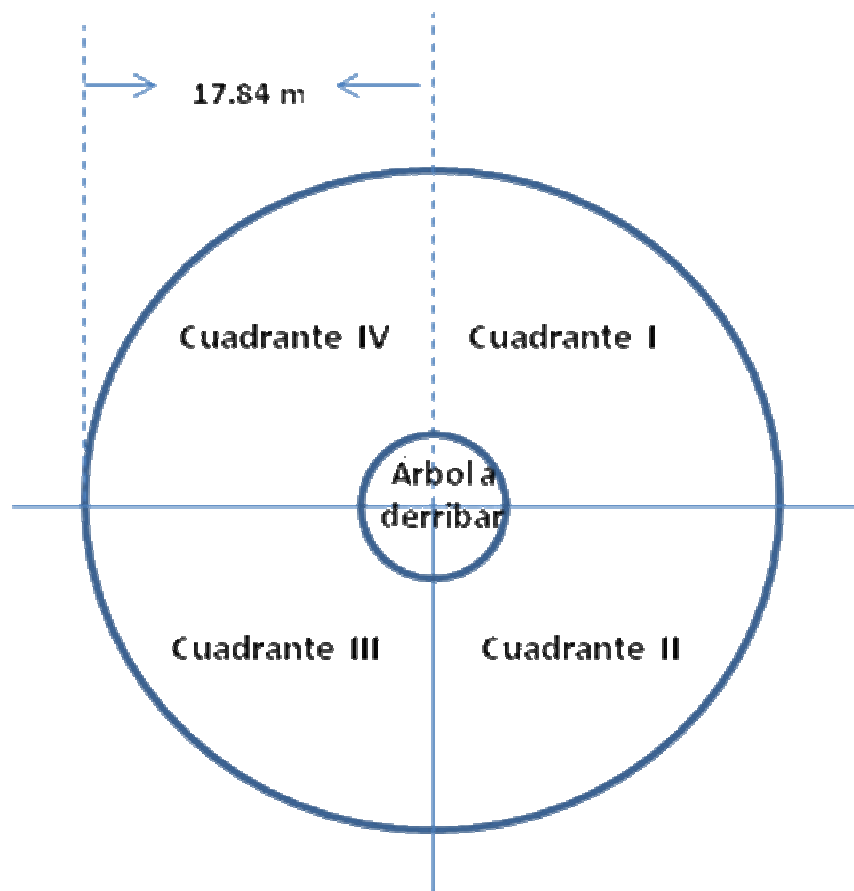


Figura 5. Esquema de la parcela de muestreo para el levantamiento de la información en campo.

3.3 Cálculo de biomasa arriba del suelo

3.3.1 Volumen del fuste

Para estimar el volumen del fuste se derribaron los árboles y se midió la altura total (ht). Posteriormente se tomaron mediciones de diferentes diámetros a lo largo del fuste, entre secciones estimadas a partir de la división de la altura total entre 10, para obtener una medida exacta entre las secciones del fuste. Para el cálculo del volumen se utilizaron ecuaciones matemáticas de tipo dendrométrico sugeridas por FAO (1980) y Romahn (1999): 1) el volumen del tocón se calculó por medio de la fórmula del neiloide truncado, 2) para cada una de las secciones (ht/10) el volumen se obtuvo con la fórmula de Smalian y 3) el del final del fuste se obtuvo con una ecuación que asemeja a un cono (Cuadro 2).

Cuadro 2. Fórmulas dendrométricas para el cálculo del volumen de fuste

Tipo dendrométrico	Parte del fuste	Fórmula
Neiloide truncado	Tocón	$Vol = H/4(S_0 + S_1 + (S_0 S_1)^{1/3} ((S_0)^{1/3} + (S_1)^{1/3}))$
Smaliam	Troza cilíndrica	$Vol = 0.7854 (D_1 + D_2/2)^2 (H_i)$
Cono	Ápice	$Vol = 0.261799 (S_0)^2 * L$

S₀ = área del diámetro menor (m); S₁ = área del diámetro mayor (m); S_m = área promedio de los diámetros menor y mayor; L = altura (m); D = diámetro; H_i = longitud de la troza

3.3.2 Determinación de la densidad de la madera

Las muestras para determinar la densidad de la madera se obtuvieron mediante la colecta de dos rodajas de corte transversal de 5 cm de longitud, la primera tomada a 1.30 m de la superficie del suelo (Sección A) y la segunda cuando la sección del fuste alcanzó 5 cm de diámetro (Sección B); estas muestras se identificaron y se secaron a temperatura ambiente para la obtención de submuestras. De la sección A se obtuvieron 3 submuestras de de 3 cm x 3 cm x 5cm (probetas) para cada árbol y en la sección B una submuestra con las mismas dimensiones. El total de submuestras fue de 368 probetas para *P. maximinoi*, 364 para *P. oocarpa* y 44 para *Quercus* sp. El cálculo de la densidad de la madera para cada submuestra se realizó por el método de máximo contenido de humedad, presentado por Smith (1954):

$$Dm = \frac{1}{\frac{ps - po}{po} + \frac{1}{1.53}}$$

donde:

Ps= Peso de la muestra saturada (g)

Po= Peso de la muestra anhidra (g)

1.53 = Constante densidad básica de la madera

Las probetas se sumergieron en agua destilada durante 22 días, cambiando el agua cada tercer día para que no crearan hongos. Una vez saturadas se pesaron con una balanza analítica (con precisión de 0.0001 g) e inmediatamente se llevaron a secar a un horno durante 26 horas a una temperatura de 105°C. Posteriormente se extrajeron y pesaron nuevamente para la obtención del peso anhidro.

Los datos de densidad obtenidos para cada especie, fueron analizadas con pruebas de normalidad y homogeneidad de varianzas; además se estimaron estadísticas descriptivas como

el promedio, la mediana, la desviación estándar, el error estándar e intervalos de confianza. Estos análisis preliminares indicaron que la mediana de la densidad de la madera tenía las mejores cualidades estadísticas para estimar la biomasa del fuste.

3.3.3 Densidad de ramas y follaje

Con el árbol derribado se procedió a separar las ramas del fuste. El follaje fue separado de las ramas y cada componente (ramas y follaje) fue pesado con una báscula con precisión de 1 kg. De cada árbol se colectó una muestra de rama con diámetro y longitud variable; el total correspondió a 71 muestras que fueron identificadas y pesadas en verde con una balanza digital con precisión a 1 g y posteriormente se llevaron al horno para obtener su peso seco y calcular la densidad específica de acuerdo con la relación peso seco - peso verde.

Con respecto al follaje, se tomaron muestras de 500 g y para cada especie, éstas se identificaron y pesaron en verde; luego fueron secadas al horno por 48 horas a 70°C para obtener su peso seco de acuerdo con la metodología empleada por Arreaga (2002).

Los datos obtenidos de las mediciones en estado verde y seco fueron utilizados para obtener la biomasa de ramas y follaje utilizando la fórmula:

$$B = \frac{P_{seco}}{P_{húmido}} * P_{total}$$

donde:

B = biomasa del componente (ramas, follaje)

P_{seco} = Peso seco del componente (ramas, follaje)

$P_{húmido}$ = Peso húmedo (verde) del componente (ramas, follaje)

P_{total} = Peso total del componente (ramas, follaje)

3.3.4 Cálculo de componentes y biomasa total

a) Biomasa del fuste: se estimó con la información de volumen del fuste total y la densidad de la madera. La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$B_f = V_t * D_m$$

donde:

Bf = Biomasa del fuste

Vt = Volumen total

Dm = Densidad de la madera

b) Biomasa de ramas: se estimó con el peso total de ramas con la biomasa de las muestras de cada árbol.

$$Br = Pr * Brm$$

donde:

Br = Biomasa de ramas

Pr = Peso de ramas

Brm = Relación peso seco - peso húmedo de la muestra de ramas

c) Biomasa follaje: se estimó utilizando promedios ponderados de materia seca y multiplicado por la fracción en verde de cada componente; luego la biomasa se transformó a carbono.

$$Bf = Pf * Bfm$$

donde:

Bf = Biomasa del follaje

Pf = Peso del follaje

Bfm = Relación peso seco peso húmedo de la muestra del follaje

d) Biomasa total: se estimó sumando los tres componentes de biomasa: fuste, ramas y follaje.

$$Bt = Bft + Br + Bf$$

donde:

Bt = Biomasa total

Bft = Biomasa del fuste total

Br = Biomasa ramas

Bf = Biomasa del fuste

3.3.5 *Factor de expansión de biomasa*

Se determinó un FEB para cada especie. Este factor se determinó dividiendo la biomasa total sobre el suelo entre la biomasa del fuste (Segura y Kanninen 2002). La ecuación utilizada fue la siguiente:

$$FEB = \frac{bt}{bf}$$

donde:

FEB = Factor de expansión de biomasa

bt = Biomasa total

bf = biomasa del fuste

La obtención del FEB se hizo con la finalidad de tener un dato adicional para poder estimar la biomasa total cuando no se cuente con otras técnicas de cálculo de biomasa total, en este caso el FEB sólo se calculó para conocer la relación biomasa total entre la biomasa del fuste. En este trabajo la biomasa total de los árboles y por parcelas se calculó mediante modelos alométricos. El FEB puede ser utilizado también para calcular la biomasa a nivel de árbol y de parcela mediante el siguiente procedimiento:

$$Bt = vt * dm * feb$$

donde:

Bt = biomasa total

Vt = volumen total

Dm = densidad de la madera

Feb = factor de expansión de biomasa

3.3.6 Cálculo de carbono arriba del suelo

Para la estimación del carbono almacenado en árboles individuales este cálculo se realizó a partir de los datos de biomasa total de cada árbol, empleando la fracción de carbono $FC = 0.5$ la cual representa el porcentaje de carbono presente en dicha biomasa (IPCC 1996).

$$Cat = Bt * Fc$$

donde:

Cat = Carbono almacenado total

Bt = Biomasa total

Fc = Fracción de carbono (0.5)

3.3.7 Validación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa

La información de los árboles individuales fue estructurada en una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel 2007; para su análisis estadístico se utilizó el software de InfoStat versión 2008. Se probaron modelos para estimar la biomasa total por árbol a partir de las variables regresoras como dap , htp , $dcopa$, hic y $lcopa$. En primer lugar se realizaron análisis de regresión lineal aplicándoles la prueba de Atkinson para ver si era necesario la transformación de potencia de la variable respuesta. Esta transformación tiene la forma $Y^* = (y^\lambda - 1)/\lambda$. InfoStat calcula el parámetro γ , que se relaciona como $\lambda = 1 - \gamma$. La prueba de Atkinson sugirió la transformación de la variable dependiente biomasa total tanto para *P. maximinoi* como para *P. oocarpa* en potencia $Y^{1/2}$ (raíz cuadrada de Y).

Los modelos fueron validados por el análisis de residuales y pruebas de bondad de ajuste, residuos parciales, valores de coeficiente de determinación R^2 y R^2 ajustado, cuadrado medio del error (CME) y el criterio de predicción de Mallows. Se usaron gráficos de residuos vs predichos, residuos parciales vs predichos, y valores Leverage. Las pruebas de hipótesis para las variables regresoras se realizaron con un nivel de significancia $\alpha=0.05$. Para la validación de los modelos también se usaron los criterios de información de Akaike (AIC) y el criterio bayesiano de Schwarz (BIC) (Chave et ál. 2005). Según la parametrización que usa InfoStat para AIC y BIC, los mejores modelos presentan los valores más bajos para ambos criterios de ajuste.

También se probaron los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilks y gráficos q-q plot. La homocedasticidad se evaluó mediante análisis de gráficos de residuos vs. predichos y la prueba de Levene.

3.3.8 Estimación de biomasa total por hectárea mediante intervalos de confianza

Para la obtención de los intervalos de confianza de biomasa se consideró que la biomasa individual de cada árbol fueron estimadas mediante un modelo alométrico, por lo tanto estas estimaciones tiene un error de estimación asociado (si se hubiera derribado cada árbol para luego pesarlo no existiría este error).

Para calcular este error, en primer lugar se calculó el error estándar de estimación para cada árbol y cada una de las especies presentes en las parcelas (esto se realizó despejando el error estándar del intervalo de confianza para la esperanza de y dado x en cada árbol). Luego, las varianzas de estimación de los árboles dentro de cada parcela se sumaron, asumiendo que los árboles fueron independientes. Si bien puede ocurrir que algunos árboles no sean independientes para su producción de biomasa, debido a su cercanía con otros árboles o por efecto de la densidad de los rodales, esta estimación de la varianza es sobreestimada en caso de no independencia. Por este motivo los intervalos de confianza resultantes pueden ser conservadores.

Para cada una de las 79 parcelas se obtuvo la biomasa total y la varianza de estimación de cada parcela (suma de las varianzas individuales de los árboles presentes en cada parcela). Estas varianzas fueron promediadas para obtener la varianza promedio de estimación; luego se calculó la varianza de las biomasa total estimadas de las 79 parcelas, y estas dos varianzas fueron sumadas. Para el cálculo de los intervalos de confianza, se usó como error estándar la raíz cuadrada de esta suma de varianzas. Para el cálculo de los límites de confianza se utilizó la siguiente expresión:

$$LIC = \text{Biomasa total estimada} \pm t_{1-\alpha/2} * \sqrt{\text{Varianza de estimación} + \text{Varianza de parcelas}}$$

donde:

LIC = Límites del intervalo de confianza

$t_{1-\alpha/2}$ = Percentil $1-\alpha/2$ de una distribución t de Student

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Biomasa aérea en árboles individuales

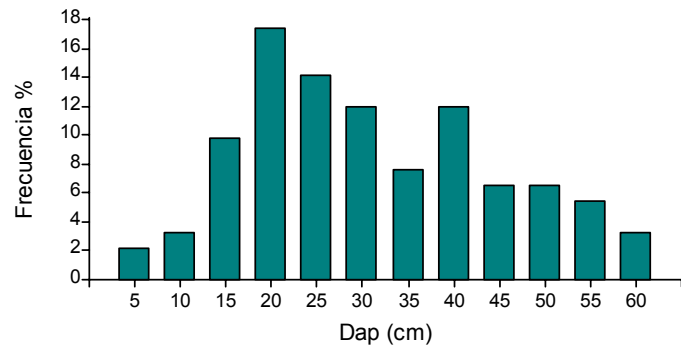
El tamaño muestral de árboles medidos y pesados en los bosques naturales del Ejido Coapilla, correspondió a 92 árboles de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, 91 de *Pinus oocarpa* var *Ochoterenai* y 44 árboles de *Quercus* sp. Para la generación de ecuaciones de biomasa aérea fueron evaluadas 10 variables (Cuadro 3) en cada una de las tres especies estudiadas. A estas variables se les calculó la estadística descriptiva básica. La edad muestreada para *P. maximinoi* osciló entre 6 y 62 años con dap de entre 6 y 67.2 cm. Para *P. oocarpa* la edad osciló entre 6 y 76 años y el dap de 5.5 a 63.7 cm. Con respecto a la especie de *Quercus* sp. su dap osciló entre 7 a 52 cm (Cuadro 3). Las categorías diamétricas en este trabajo son similares a las reportadas por Jiménez et ál. (1998) en bosques de *Pinus pseudostrobus* en Nuevo León, México, donde utilizaron 563 individuos para la elaboración de tablas de volumen, los diámetros oscilaron entre 4.5 a 64.5 cm. cubriendo la mayor parte de las categorías dimétricas.

Cuadro 3. Estadísticas descriptivas de las variables consideradas en la medición de árboles individuales de las tres especies de estudio

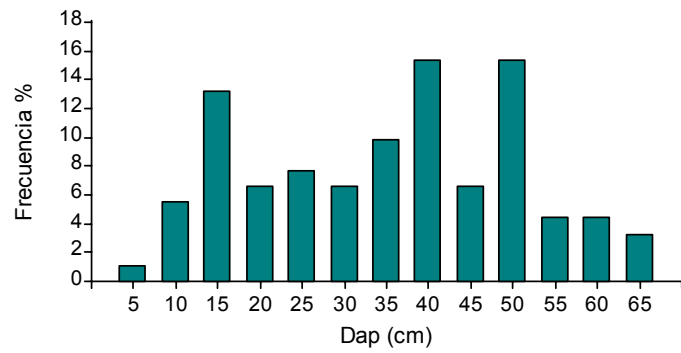
Variables dendrométricas	<i>Pinus maximinoi</i>			<i>Pinus oocarpa</i>			<i>Quercus</i> sp.		
	Media	Máx	Mín	Media	Máx	Mín	Media	Máx	Mín
Edad (años)	28	62	6	38.9	76	6	-	-	-
Diámetro (cm)	29	67.2	6	32.9	62.7	5.5	30.2	52	7
Altura en pie (m)	21.2	38	8	20.9	37	5	19.2	29.3	7.2
Altura derribada (m)	21.2	36.1	7.9	21.2	37.2	5.5	19.2	29.4	7.2
Altura inicio de la copa (m)	10.4	22.1	0.9	9.9	21.3	0.6	5.4	11.9	1.7
Diámetro de copa (m)	5.8	11.2	2	8.4	18.5	1.7	8.9	18	1.6
Longitud de copa (m)	11.2	19.2	4	11.2	24	3.8	13.8	26.9	4.3
Volumen (m ³)	0.9021	3.9463	0.0122	1.277	4.5279	0.00709	1.197	3.46	0.0157
Peso de ramas (kg)	100.5	168	2	212.9	1050	0.9	141.7	366	2.6
Peso del follaje (kg)	51.7	321	2	70.6	245	2.7	51.5	106	0.4

Máx = máximo valor observado en los datos; Mín = mínimo valor observado en los datos.

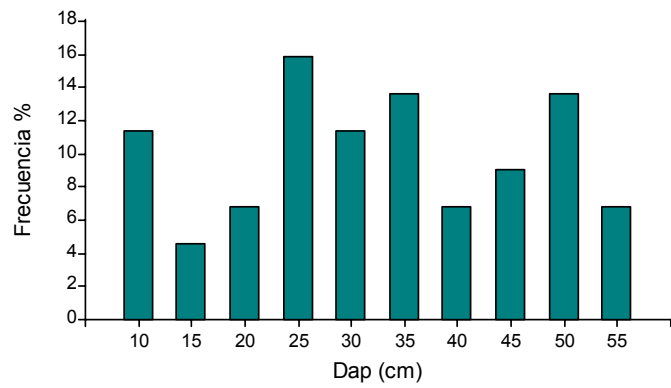
La distribución muestral de individuos por clases diamétricas presenta una distribución más o menos simétrica, con concentración de valores en las categorías diamétricas intermedias en el caso del *P. maximinoi*, pero tanto en el caso del *P. oocarpa* como en *Quercus* sp. la distribución diamétrica observada fue menos regular (Figura 6).



a) *Pinus maximinoi*



b) *Pinus oocarpa*



c) *Quercus* sp.

Figura 6. Frecuencia de la distribución diamétrica para: a) *Pinus maximinoi* H. E Moore, c) *Pinus oocarpa* var *Ochoterenai* y d) *Quercus* sp.

4.1.1 Densidad de la madera

El proceso para determinar la densidad básica se realizó con 776 muestras para las tres especies; 368 correspondieron para *P. maximinoi*, 364 para *P. oocarpa* y 44 para *Quercus* sp. La densidad promedio de la madera de las tres especies forestales provenientes de un bosque natural osciló entre 0.42 y 0.65 g/cm³ (Cuadro 4). La especie que presentó mayor densidad fue *Quercus* sp., seguida por *Pinus oocarpa* y finalmente *Pinus maximinoi*. Dentro de los componentes, el valor más alto de densidad se encontró en el fuste en la sección A (extraída a 1.30 m) y más baja en la sección B (extraída en donde el ápice llegaba a 5 cm de diámetro). Según Harold y Hocker (1984), esto es debido a que la mayoría de los árboles medidos mostraron una madurez fisiológica que repercute biológicamente en presentar mayor cantidad de duramen en la parte basal del fuste.

Cuadro 4. Medias de resumen de la densidad de la madera para las tres especies de estudio

Especie	Sección	N	Media	Mediana	DE	EE	Máx	Mín
<i>Pinus maximinoi</i>	A	276	0.507	0.508	0.057	0.006	0.685	0.373
	B	92	0.420	0.422	0.056	0.006	0.617	0.303
<i>Pinus oocarpa</i>	A	273	0.562	0.586	0.064	0.007	0.657	0.382
	B	91	0.495	0.497	0.068	0.007	0.628	0.364
<i>Quercus</i> sp.	A	44	0.650	0.660	0.061	0.009	0.740	0.493

Sección A = muestra obtenida a 1.30 m arriba del suelo. B = muestra obtenida cuando el fuste final alcanzó 0.5 cm de diámetro. N = número de datos observados; DE= Desviación estándar; EE = Error estándar; Máx = máximo valor observado en los datos, Mín = mínimo valor observado en los datos.

Algunos estudios referentes a la densidad básica de la madera en pinos muestran valores cercanos a los encontrados en este estudio. En el caso de *Pinus greggii* en una plantación de 17 años en el valle de México fue de 0.42 g/cm³ (Valencia y Vargas 1997). Para la misma especie en un bosque natural en el norte de México se observó una densidad de 0.47 g/cm³, considerándosele como una madera moderadamente liviana (Valencia y Vargas 1997).

Por otra parte, en una plantación de *Pinus patula* de 16 años la densidad mostró que a edades tempranas presenta un decremento, posteriormente incrementa gradualmente hasta estabilizarse entre los 12 y 14 años de edad, alcanzando 0.47 gr/cm³ (Meza et ál. 2005). Un reporte de densidad de la madera para *Pinus caribaea* evaluada en una plantación de 11 años de cinco procedencias de México y América Central establecida en la región de los Tuxtlas,

Veracruz, mostró una densidad de 0.383 g/cm^3 , ubicándola como madera liviana (Zamora y Mendizábal 2004).

Ramírez et ál. (2004), en una plantación de 35 años de *Pinus oocarpa* en Venezuela, observaron un valor promedio de 0.4518 g/cm^3 . Estos autores indican que la densidad de la madera para plantaciones de esta especie se ve influenciada por su edad, las condiciones del sitio y sus características genotípicas.

Nájera et ál. (2005) reportan para *Quercus laeta*, en la región Norte de México, una densidad de 0.68 g/cm^3 . Los mismos autores reportan para *Quercus sideroxila* una densidad básica de 0.63 g/cm^3 , que de acuerdo con la clasificación de Torreli (1982), corresponde a una madera considerada de densidad alta y dentro del rango de valores de 0.69 a 0.76 g/cm^3 mencionados en la literatura para encinos.

De acuerdo con Honorato y Fuentes (2001), la densidad de la madera de los encinos varía de acuerdo con la ubicación de la albura que presenta menor densidad que el duramen, por tratarse de manera joven con actividad fisiológica activa. La densidad de 0.65 g/cm^3 encontrada en este estudio es coherente con los valores de densidad obtenidos en otros estudios para especies del mismo género. (Cordero y Boshier 2003), reportan una densidad de 0.59 a 0.63 para *Q. costaricensis*, 0.71 para *Q. copeyensis*, 0.72 a 0.96 para *Q. sapotifolia*, 0.68 a 0.89 para *Q. peduncularis*, 0.86 para *Q. oleoides*, y 0.73 para *Q. skinneri*.

4.1.2 Factor de expansión de biomasa

El cálculo del FEB se realizó dividiendo la biomasa aérea total entre la biomasa seca del fuste. Se calcularon las medidas de resumen del FEB para *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *Quercus* sp. (Cuadro 5). Se resalta un mayor FEB para *P. oocarpa* y *Quercus* sp., comparado con *Pinus maximinoi*, esto debido a la estructura fenotípica de estas especies que presentan mayor abundancia de ramas y follaje, además de presentar una densidad básica mayor como se muestra en los resultados anteriores.

Arreaga (2002), estimó un FEB para un grupo de especies maderables en el Petén Guatemala de $1.6 (\pm 0.582)$ lo cual significa que por cada tonelada de biomasa total, se esperaría que en promedio se tuvieran 0.62 toneladas de biomasa de fuste; cuando un árbol cuenta con tres toneladas de biomasa, alrededor de 1.88 toneladas corresponderán al fuste; es

decir aproximadamente el 62 %. Por su parte, Segura (1999) reporta un FEB con rango de 1.3 a 2.2 para siete especies forestales de Costa Rica, mientras que Aguilar (2002) reporta un promedio de 1.8 para 17 especies de la unidad de manejo de Uxactun, Guatemala. Brown (1989) reportan un rango promedio de FEB de 1.55 y 1.74 para bosques húmedos basándose en datos de inventarios y también presentados por ecuaciones de regresión.

Cuadro 5. Medidas de resumen del cálculo del factor de expansión de biomasa para las tres especies estudiadas

Especie	FEB	N	Media	Mediana	DE	EE	Máy	Mín
<i>Pinus maximinoi</i>	1.25	92	1.225	1.190	0.134	0.014	1.896	1.060
<i>Pinus oocarpa</i>	1.27	91	1.267	1.204	0.245	0.026	2.807	1.055
<i>Quercus sp.</i>	1.27	44	1.272	1.223	0.192	0.029	2.030	1.070

FEB = Factor de expansión de biomasa; N= Número de datos observados; DE = Desviación estándar; EE = Error estándar; Máx = máximo valor observado; Mín = mínimo valor observado.

4.2 Modelos alométricos para la estimación de biomasa total

4.2.1 Biomasa total para *Pinus maximinoi*

La mayor parte de los árboles mayores a 5 cm de dap mostraron mayor contenido de biomasa en el fuste, continuando con las ramas y finalmente el follaje. En promedio el contenido de biomasa en los diferentes componentes de *Pinus maximinoi* se distribuyó en un 87.6 % en el fuste, 8.5 % en ramas y 3.9 % en follaje. A partir de la sumatoria de estos componentes se estimó la biomasa total.

Para el cálculo de la biomasa del fuste se utilizó la mediana de los datos de densidades de las muestras obtenidas por cada árbol. La mediana permitió identificar los valores más representativos de los datos de densidad, además de presentar mejores cualidades estadísticas del valor promedio de las muestras de densidades.

Para la estimación de biomasa total y para los componentes de biomasa a través de modelos lineales, se aplicó la prueba de Atkinson que permitió analizar si era necesario usar una transformación de potencia a la variable de respuesta. Estas transformaciones logran generalmente linealizar la relación entre la variable de respuesta y las predictoras y también pueden contribuir a la mejora del supuesto de distribución normal y a que exista mayor homogeneidad de varianzas, cumpliendo así los supuestos para la validación de los modelos.

En este caso, para la variable biomasa total, la prueba de Atkinson sugirió la aplicación de una transformación de raíz cuadrada para lograr un mejor ajuste de los modelos.

Se evaluaron numerosos modelos lineales y no-lineales para estimar biomasa total a partir de variables independientes como el diámetro a la altura del pecho (dap), la altura total en pie (htp), la altura al inicio de la copa (hic), longitud de copa (lcopa), diámetro de copa (dcopa) y la edad. Los modelos que presentaron mejor ajuste fueron los que contenían dap, htp y dcopa; éstos presentaron valores R^2 y R^2 -ajustados de 0.97. Tanto los parámetros como el modelo fueron significativos ($P < 0.05$) (Cuadro 6). Por otra parte, para la validación de los modelos también se consideraron los criterios estadísticos de información de Akaike (AIC) y criterio bayesiano de información (BIC), utilizándolos para la selección del mejor modelo dentro de un conjunto de modelos lineales probados. De acuerdo a estos criterios el modelo es mejor que otro si tiene un valor AIC o BIC menor.

Los modelos probados fueron desarrollados con árboles de 6 a 67.2 cm de dap. En las regresiones de los modelos lineales y no lineales, la variable dap como variable regresora fue importante para la estimación de biomasa total; también se utilizaron variables como la htp y el dcopa. Un criterio importante para la toma de decisiones es el costo que representan en la evaluación en campo las distintas variables y su facilidad de medida. Si bien un modelo con más variables puede llegar a ofrecer un mejor ajuste (*i.e.* el R^2 -ajustado más alto), muchas veces el costo o la dificultad de la inclusión de nuevas variables no justifica la mejoría en el ajuste del modelo.

Estudios sobre estimación de biomasa mediante modelos alométricos utilizados por Nelson et ál. (1999) y Araujo et ál. (1999) utilizaron variables como el dap, altura total, pero también dentro de los modelos presentados utilizan la variable dap como única variable regresora para estimar biomasa total. Arreaga (2002), estimó el carbono almacenado en bosques con manejo forestal en El Petén, Guatemala, utilizando modelos lineales en función de variables regresoras como el dap, la altura total y altura comercial. Estos modelos presentaron coeficientes de determinación ajustados de 0.38 y 0.48.

Cuadro 6: Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa total para *Pinus maximinoi*

Modelo	R ²	R ² -A	CME	AIC	BIC
$Bt = 0.3780 \cdot dap^{2.1064}$	0.95	0.95	28555.86	-	-
$Bt = 0.0551 \cdot (dap \cdot htp)^{1.3895}$	0.97	0.97	22219.40	-	-
$Bt = \text{Exp}(-0.9728 + 2.1064 \cdot \log(dap))$	0.95	0.95	28827.50	-	-
$Bt = \text{Exp}(-2.3616 + 1.6936 \cdot \ln(dap) + 0.8866 \cdot \ln(htp))$	0.97	0.97	19033.80	-	-
$Bt^{1/2} = -8.2498 + 0.7853 \cdot edad + 0.5780 \cdot htp$	0.95	0.95	7.5092	451.51	461.51
$Bt^{1/2} = -7.1216 + 0.2208 \cdot dap + 0.4805 \cdot htp + 0.3611 \cdot edad$	0.97	0.97	3.9529	393.44	406.05
$Bt^{1/2} = -6.8842 + 0.6823 \cdot dap + 0.3551 \cdot htp$	0.97	0.97	4.8188	410.71	420.79
$Bt^{1/2} = -7.704 + 0.627 \cdot dap + 0.376 \cdot htp + 0.339 \cdot dcopa$	0.97	0.97	4.7036	409.44	422.05

R²= Coeficiente de determinación; R²-A; coeficiente de determinación ajustado; CME = Cuadrado medio del error; AIC = Criterio de información de Akaike; BIC = Criterio bayesiano de Schwarz.

El modelo más sencillo para *Pinus maximinoi* es un modelo no-lineal; con solo la variable dap como regresora se puede estimar de manera confiable la biomasa total (Figura 7).

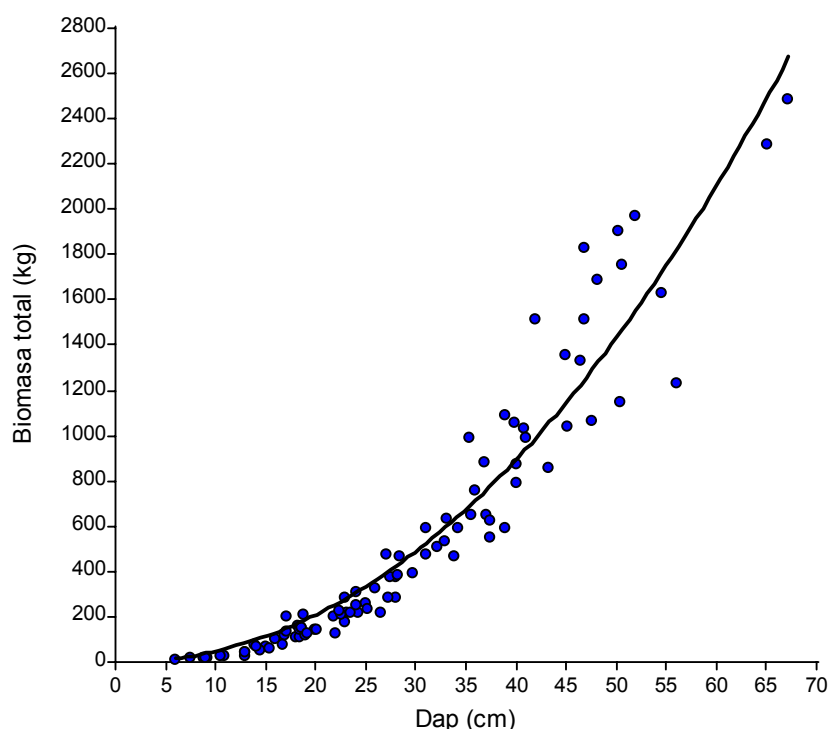


Figura 7. Relación alométrica de biomasa total con respecto al diámetro construido para *Pinus maximinoi*

La ecuación tiene una expresión de la forma $Bt = 0.3780 * dap^2 + 2.1064$. Esta ecuación utiliza la variable dap para estimar la biomasa total con un nivel de confianza aceptable, tomando en cuenta el R^2 de 0.95. Sin embargo, también se pueden utilizar los modelos que incluyen las variables como la edad, la htp y el $dcopa$ con R^2 y R^2 ajustados mayores a 0.97 respectivamente. Onyekwelu (2004), en un estudio hecho con 120 árboles de *Gmelina arborea* en Nigeria, con edades entre los 5 y los 21 años, logró un R^2 de 0.989 para el modelo $Ln(Bt) = a + b Ln(dap)$.

En función de los valores estadísticos de ajuste presentados y teniendo en cuenta los costos de la evaluación de variables para la estimación de la biomasa total, es más recomendable utilizar el modelo que incluye las variables dap y htp , dado que los demás modelos explican también el 97% de la variabilidad de los datos pero son más costosos de evaluar. Amarilis (2002), en un estudio para determinar biomasa total en *Cybistax donnell-smithii*, *Calophyllum brasiliense*, *Vochysia guatemalensis* en bosques naturales, empleó 20 árboles para cada especie, haciendo un total de 60 unidades de muestreo. Con estos datos generó modelos alométricos de tipo exponencial de la forma $Biomasa = e^{(a*dap+b*ht)}$, obteniendo un coeficiente R^2 mayor a 0.97. En otro estudio reportado por Loguercio y Defossé (2001) para estimar biomasa aérea de *Nothofagus pumilio* mediante un proceso destructivo de 59 árboles con un amplio rango de entre 10 a 90 cm de dap en el So del Chubut, Argentina, utilizó un grupo de 9 modelos lineales entre los que consideraban al dap como única variable regresora; el modelo que mejor ajuste obtuvo fue $BT = 32.6488 - 5.6761 * dap + 0.5108 * dap^2$ con un R^2 de 0.98.

Una ventaja en la utilización de esta función de dos entradas para la evaluación de la biomasa total en el estado de Chiapas, es que por ley los inventarios para el manejo forestal en los bosques de pino – encino cuentan estas variables como mediciones obligatorias para la cuantificación volumétrica, por lo tanto también están disponibles para determinar el carbono a partir de la biomasa total.

4.2.2 Biomasa total para Pinus oocarpa

Para la estimación de la biomasa en *Pinus oocarpa* fueron considerados diámetros mayores a 5.5 como mínimo y máximo de 62.7 cm, presentando mayores porcentajes de biomasa en el fuste con un 84.8%, en ramas un 11.2% y en follaje un 4.0%, respectivamente.

Los resultados de biomasa total en *Pinus oocarpa* presento un comportamiento similar al de *Pinus maximinoi* con tendencia en el incremento de la biomasa total a medida que las categorías diométricas incrementaban, igual comportamiento en la mayoría de las especies estudiadas para la estimación de biomasa, como en el caso de *Eucalyptus grandis* mediante 22 árboles apeados con distribución diamétrica de forma proporcional mostro que la biomasa total incrementó proporcionalmente al incremento de las categorías diamétricas Goya et ál. (1997). En otro estudio realizado por Cubero y Rojas (1999), en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* Roxb, *Tectona grandis* L. F. y *Bombacopsis quinata* Jacq, con un total de 162 árboles, 54 por cada especie, los resultados mostraron mayor contenido de biomasa en fuste, seguido por ramas. En plantaciones de *Hevea brasiliensis*, Rojo et ál. (2005) utilizaron 28 árboles muestra para determinar mediante modelos alométricos biomasa total aérea, resultando que la proporción de biomasa contenida en el tallo se correlacionó positivamente con el tamaño del árbol; el modelo alométrico utilizado fue de tipo logarítmico de la forma $\log P = (a+b*\log \text{dap})$, obteniendo una R^2 de 0.98.

De los modelos de regresión probados para estimar biomasa total para *Pinus oocarpa*, las variables correlacionadas fueron el dap, la htp, la edad y el dcopa. Cinco modelos fueron los que mejor estimaron la biomasa total; el primero con un componente cuadrático en la variable dap que presentó un R^2 y R^2 ajustado de 0.95, sin la trasformación a raíz cuadrada en la variable de respuesta, mientras que el resto de los modelos presentaron un coeficiente de determinación R^2 de 0.97. Sin embargo, los modelos presentados pueden estimar la biomasa total de forma exacta para esta especie (Cuadro 7), las funciones seleccionadas fueron validados por sus mejores bondades de ajuste estadístico.

En un estudio realizado para estimar biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda*, en el sur de Paraná Brasil, Sanquetta et ál. (2001) estimaron la biomasa de 18 árboles apeados con edades de 17 a 21 años mediante modelos alométricos. Los resultados mostraron que los modelos que mejor ajustaron son aquellos que presentaban variables de fácil medición (dap y ht), pues estiman mejor la biomasa (área y subterránea) los modelos presentan la forma: $Bt = a + b * \text{dap} + c(\text{dap}^2*\text{ht})$ y $Bt = a+b*\text{dap}+c\text{dap}^2+d(\text{dap}^2\text{ht})$, obteniendo coeficientes de determinación de R^2 de 0.87 y 0.88.

Cuadro 7. Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa total para *Pinus oocarpa*

Modelo	R ²	R ² -A	CME	AIC	BIC
$Bt = -10.4113 + 5.3998 \cdot dap + 0.8144 \cdot (dap)^2$	0.95	0.95	32554.61	1208.74	1218.79
$Bt^{1/2} = -6.3363 + 0.7711 \cdot dap + 0.3544 \cdot htp$	0.98	0.98	4.332	396.61	406.65
$Bt^{1/2} = -4.99 + 0.42 \cdot htp + 0.57 \cdot dap + 0.0027 \cdot (dap)^2$	0.98	0.98	4.033	390.89	403.45
$Bt^{1/2} = -6.783 + 0.681 \cdot dap + 0.300 \cdot htp + 0.491 \cdot dcopa$	0.98	0.98	3.444	376.70	389.26
$Bt^{1/2} = -6.375 + 0.121 \cdot edad + 0.642 \cdot dap + 0.315 \cdot htp$	0.98	0.98	3.953	389.23	401.79
$Bt^{1/2} = -4.0208 + 0.1708 \cdot edad + 0.7134 \cdot dap$	0.98	0.97	5.312	415.17	425.21

R² = Coeficiente de determinación; R²-A = coeficiente de determinación ajustado; CME = Cuadrado medio del error, AIC = Criterio de información de Akaike; BIC = Criterio bayesiano de Schwarz.

Las variables asociadas para la estimación de la biomasa total también estuvieron correlacionadas con el dap, htp, edad y el dcopa; sin embargo, con solo utilizar la variable dap con aplicación cuadrática se puede lograr buen ajuste (Figura 8) con un clásico crecimiento de tipo cuadrático a medida que la variable dap incrementa.

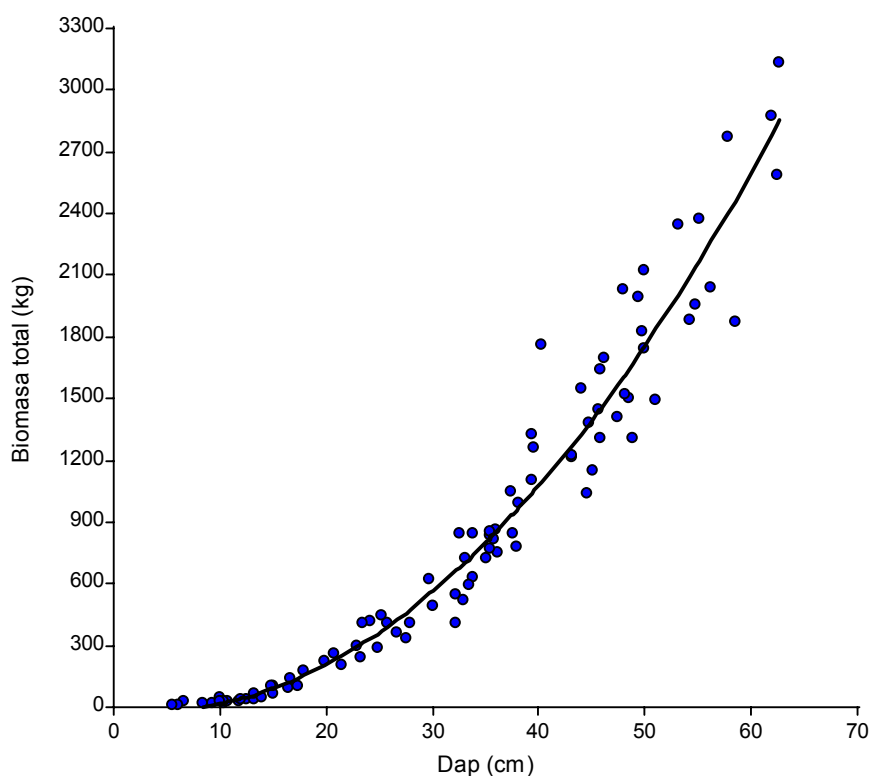


Figura 8. Relación alométrica de biomasa total en función del dap para *Pinus oocarpa*.

En la Figura 8 puede observarse un incremento continuo en biomasa total acumulada por los árboles dominantes y codominantes a razón del incremento de las categorías diamétricas y por el desarrollo del bosque. El modelo empleado para estimar la biomasa es de la forma $Bt = -10.4113 - 5.3898 * dap + 0.8144 * (dap)^2$. La tendencia del modelo de tipo cuadrático explica en un 95% de la variabilidad de los datos, lo cual se debe a la relación directa que existe entre el cuadrado del dap y el volumen total del fuste. Esta tendencia es también reportada por muchos autores tales como Arrega (2002), quien determinó el carbono almacenado en bosques naturales en El Petén, Guatemala, encontrando una alta correlación entre la variable dap y biomasa total mostrando un comportamiento típico del efecto del dap sobre la biomasa total de tipo cuadrático.

El nivel de desarrollo de los árboles individuales se ve reflejado tanto en altura como en diámetro, lo que influye directamente en la ganancia de biomasa. La influencia del incremento del diámetro tiene una relación positiva con respecto al incremento de la biomasa siguiendo una tendencia de crecimiento de tipo ascendente, en la cual se da una ganancia en biomasa a medida que el dap aumenta, al mismo tiempo la acumulación de biomasa en ramas aumenta a medida que aumenta el dcopa (Arrega 2002).

4.2.3 Biomasa total para *Quercus* sp.

Los bosques templados fríos por lo general conservan patrones de crecimiento uniforme tanto a nivel vertical como horizontal, presentando por lo general tres estratos: arbóreo, arbustivo y herbáceo. Como estructura dominante están los pinares y como codominante los encinos de hojas simples y coriáceas que proveen una mayor cantidad de hojarasca, sus copas que cubren alrededor del 45 al 50% de la superficie. Estas dos especies por lo general aportan mayor contenido de biomasa en este tipo de ecosistemas (Nájera 2005). La biomasa total en la especie de *Quercus* sp. se distribuyó por componentes con el 87.2 % en fuste, el 9.8% en ramas menores a 4 cm de diámetro y el 2.3% en follaje. Estos resultados guardan similitud con especies latifoliadas subtropicales como *Hevea brasiliensis*, donde en promedio los componentes aportaron el 73.9% en fuste y 27.1% en ramas. Estos porcentajes incrementaron a medida que aumentó la edad de la plantación (Monroy y Navar 2004).

Los modelos generados para esta especie estuvieron más correlacionados con las variables dap, htp y el dcopa, con valores de R^2 y R^2 ajustados mayores a 0.96. En este caso se

ajustaron ocho modelos en su mayoría con transformación a raíz cuadrada en la variable de respuesta (Cuadro 8). Los modelos que se presentan son los recomendados para predecir la biomasa total para *Quercus* sp. por las mejores bondades de ajuste estadístico. Los modelos generados, basados en regresiones lineales, evidencian que tienen una tendencia a incrementar la biomasa total conforme aumenta el dap, en un rango de 7 a 52 cm aportando resultados confiables como se muestran en la tabla de resultados.

Cuadro 8. Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa total para Quercus sp.

Modelo	R²	R²-A	CME	AIC	BIC
$Bt = 0.1269*dap^{2.5169}$	0.98	0.98	38496.2	-	-
$Bt=0.0559*(dap*htp)^{1.4646}$	0.96	0.96	66597.7	-	-
$Bt = \text{Exp}(-2.4609+2.3328*\ln(dap)+0.3407*\ln(htp))$	0.98	0.98	37562.3	-	-
$Bt^{1/2} = 4.483+1.081*dap+-1.331*htp+0.035*(htp)^2$	0.97	0.97	7.554	219.65	228.57
$Bt^{1/2} = -1.1277+0.6403*dap+0.0074*(dap)^2$	0.97	0.97	7.892	220.66	227.79
$Bt^{1/2} = -1.8912+0.2671*htp+0.4514*dap+0.0087(dap)^2$	0.97	0.97	7.549	219.82	228.53
$Bt^{1/2} = 5.544-3.369*dap+0.048*(dap)^2+0.0005*(dap)^3$	0.97	0.97	7.179	217.40	226.32
$Bt^{1/2} = -6.4452+1.1224*dap+0.1375*htp+0.4209*dcopa$	0.96	0.96	9.147	228.06	236.98

R² = Coeficiente de determinación; R²-A = coeficiente de determinación ajustado; CME = Cuadrado medio del error, AIC = Criterio de información de Akaike; BIC = Criterio bayesiano de Schwarz.

Los resultados obtenidos de las regresiones lineales y no lineales de los ecuaciones seleccionadas, en su mayoría obtuvieron R² y R² ajustados mayores a 0.96 y menores AIC y BIC, lo que muestra que cualquier modelo puede ser utilizado para la estimación de biomasa total para la especie de *Quercus* sp. Sin embargo, de las ocho ecuaciones se puede utilizar la ecuación no lineal que emplea el dap como una variable responsable de estimar la biomasa total: $Bt = 0.1269*dap^{2.5169}$. Este modelo, al igual que los parámetros estimados, fueron significativos ($p < 0.0001$), con un R² y R² ajustado de 0.98, lo que significa que el modelo explica 98% de la variabilidad de los datos. También se puede utilizar de manera confiable la ecuación de orden cúbica que utiliza únicamente la variable dap: $Bt^{1/2} = 5.544 - 3.369*dap+0.048*(dap)^2+0.0005*(dap)^3$. Esta ecuación presenta un R² y R² ajustado de 0.97, además presenta valores bajos en los criterios de decisión AIC y BIC que son menores comparados con las demás ecuaciones. Otro modelo que también se puede utilizar para la

estimación de la biomasa total para *Quercus* sp. es el de tipo exponencial con aplicación del logaritmo natural a la variable dap y altura, con un R^2 y R^2 ajustado de 0.98.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Acosta et ál. (2002), quienes a través de ecuaciones alométricas para estimar biomasa total en seis especies forestales de bosque mesófilo de montaña y bosque de encino (*Quercus* sp.), con especies estudiadas de *Clethra hartwegii* Britt con 6 muestras, *Rapanea miricoides* (Schl.) Lundell con 6, *Alnus glabrata* Fernald con 10, *Liquidambar macrophylla* Oerst con 10. *Inga* sp. con 12 y *Quercus peduncularis* Née con 8 muestras. Los modelos alométricos empleados fueron de la forma $Y = a \cdot X^b$, todas las ecuaciones generadas para cada especie presentaron coeficientes de determinación R^2 mayores a 0.97. Los valores más altos de R^2 (0.99) se obtuvieron para *Liquidambar*, *Rapanea* y *Quercus*; la variable regresora utilizada para la estimación de la biomasa total fue el dap. El modelo empleado de tipo exponencial aportó mejores resultados de ajuste con solo utilizar la variable dap; el número de árboles utilizados para la estimación de la biomasa para cada especie osciló entre 6 a 12 individuos. Los resultados obtenidos por Acosta et ál. (2002) son similares a los obtenidos en este estudio para la obtención de biomasa total, pero diferentes en la estimación de biomasa por componentes.

En este estudio, al utilizar ecuaciones de tres entradas (dap, htp y dcopa) de tipo lineal polinómico también se logran estimaciones de biomasa más confiables; sin embargo, estos modelos requieren medir tanto la altura total como el diámetro de copa de los árboles, cuyas mediciones están sujetas a error debido a que en muchos casos la altura total de un árbol no es completamente visible por la presencia de otros árboles. La consideración de la variable dap, que está más correlacionada con la variable de respuesta, permite obtener un modelo de tipo exponencial de la forma $Bt = 0.1269 \cdot \text{dap}^{2.5169}$ cuya ecuación obtuvo una R^2 de 0.98 y valores bajos de AIC y BIC (Figura 9). Esta variable explica la mayor parte de la variabilidad de los datos y obtiene estimaciones adecuadas de biomasa total.

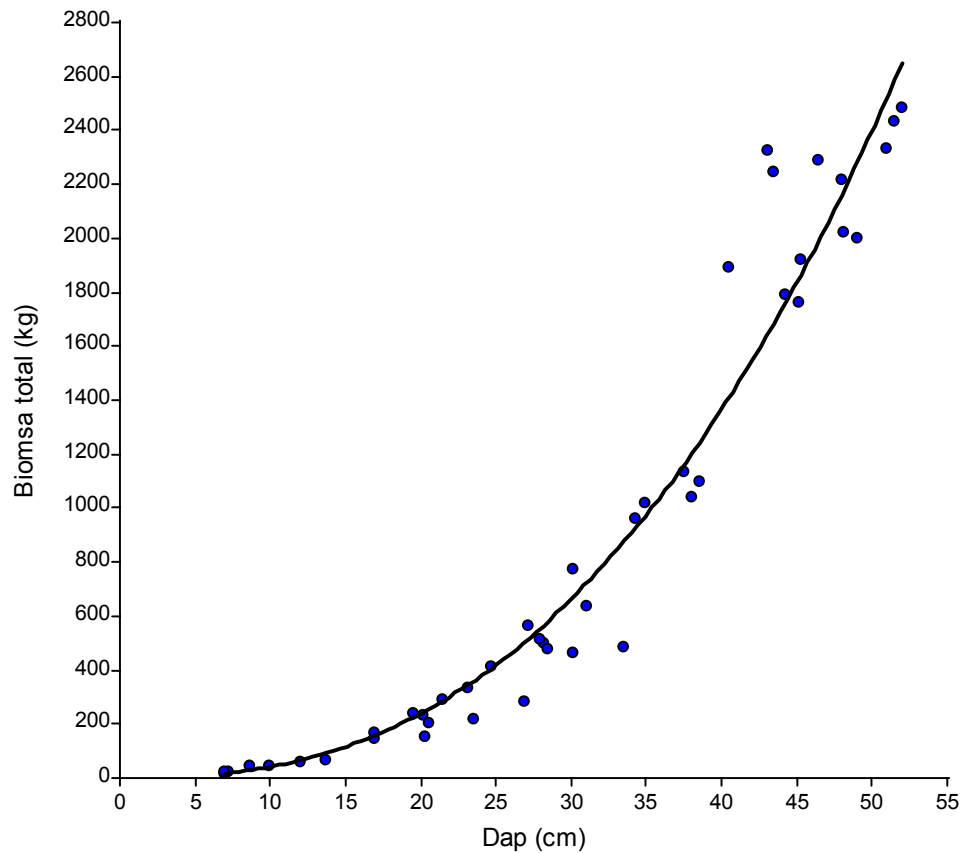


Figura 9. Relación alométrica de biomasa total en función del diámetro *Quercus sp.*

En la Figura 9 se puede apreciar el diagrama de dispersión con tendencia ascendente de tipo cuadrática, mostrando a su vez la curva de ajuste del modelo que considera al dap como una variable para la predicción de biomasa total para *Quercus sp.* notando también el incremento constante de la biomasa total a medida que el dap incrementa, por citar un ejemplo cuando el dap alcanza 45 cm se obtiene aproximadamente 1800 kg de biomasa por árbol. Por sus características de crecimiento *Quercus sp.* presenta mayor ramificación desde la base o bien a escasos metros del fuste principal comparado con las dos especies de pino que presentan crecimientos libres en sus fustes y con ramificaciones en el eje del fuste, pero de acuerdo con el gráfico presentado guarda un comportamiento similar a los gráficos de biomasa total de las dos especies de pino, esto se debe a que la acumulación de la biomasa se da de forma constante a medida que alguna variable también incrementa, en este caso el dap.

4.3 Biomasa de componentes para las tres especies estudiadas

4.3.1 Biomasa en componentes para *Pinus maximinoi*

La estimación de la biomasa total medida a través de los componentes proporciona valores de biomasa más reales que cuando se obtienen a través de cálculos basados en volumen procedentes de inventarios forestales (Brown 1989). Se estima que aproximadamente el 75 % de la biomasa de un árbol se encuentra en la biomasa aérea y el 25 % restante se halla en raíces (Gower et ál. 1993), las investigaciones de biomasa en componentes han sido menos estudiadas debido a la dificultad que representa para obtener resultados confiables (Alberto y Elvir 2005).

Para la estimación de la biomasa en los componentes de fuste, ramas y follaje se ajustaron modelos que estiman la biomasa de cada componente. Se utilizaron dos modelos sin transformaciones en las variables independientes y tres con transformaciones logarítmicas en la variable de respuesta como en las regresoras. Los modelos presentados permiten estimar la biomasa del fuste mediante variables asociadas como: dap, ht y dcopa, obteniendo un coeficiente de determinación R^2 de 0.96 a 0.98 (Cuadro 9).



Figura 10. Arquitectura de Pinus maximinoi

En general, para el fuste se encontraron valores de ajuste mejor que para ramas, y a su vez, ajustaron mejor los modelos de ramas que de follaje. De estos modelos, se recomienda utilizar el que presente variables que sean fáciles de medir en campo debido a que las variables que más se correlacionan proporcionan estimaciones adecuadas de biomasa total (Cuadro 8), la lista de los modelos se puede elegir el mejor de acuerdo con sus bondades de ajuste estadístico en los diferentes componentes. En general, para los componentes de biomasa se encontró que la variable que mayor esta explica la estimación de biomasa es el dap, seguida por la htp y el dcopa.

Cuadro 9: Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa de componente para Pinus maximinoi

Modelos	R ²	R ² -A	CME	AIC	BIC
Fuste					
$Bf^{1/2} = -7.7407+0.6518*dap+0.3638*htp$	0.96	0.96	5.18	417.43	427.51
$Bf^{1/2} = 0.6862+0.1687*(dap)+0.0212*(dap)^2-0.0002*(dap)^3$	0.95	0.95	7.04	444.56	452.13
$\log(Bf) = -1.76+2.1720*\log(dap)+0.84*\log(htp)-0.031*\log(dcopa)$	0.98	0.98	0.01	-182.27	-169.66
$\log(Bf) = -1.7598+2.1470*\log(dap)+0.8465*\log(htp)$	0.98	0.98	0.01	-184.15	-174.06
$\log(Bf) = -1.4205+2.6861*\log(dap)$	0.97	0.97	0.01	-143.92	-136.35
Ramas					
$Br^{1/2} = -0.4204+0.2341*dcopa+0.1627*dap-0.0013*(dap)^2$	0.87	0.87	1.17	281.1	293.7
$Br^{1/2} = 0.4285+0.1190*dap+0.717*htp-0.0021(htp)^2$	0.88	0.88	1.09	274.51	287.11
$\log(Br) = -0.9032+1.1816*\log(dap)+0.5908*\log(dcopa)$	0.89	0.89	0.03	-50.15	-37.54
$Br^{1/2} = -0.4204+0.2341*dcopa+0.1627*dap-0.0013*(dap)^2$	0.89	0.89	0.03	-48.78	-38.69
Follaje					
$(Bfo)^{1/2} = -0.4204+0.2341*dcopa+0.1627*dap-0.0013*(dap)^2$	0.80	0.80	0.61	221.14	233.75
$(Bfo)^{1/2} = 0.4285+0.1190*dap+0.717*htp-0.0021(htp)^2$	0.77	0.77	0.68	230.99	241.08
$\log(Bfo) = -0.9032+1.1816*\log(dap)+0.5908*\log(dcopa)$	0.81	0.80	0.03	-55.50	-45.41

R² = Coeficiente de determinación; R²-A = coeficiente de determinación ajustado; CME = Cuadrado medio del error, AIC = Criterio de información de Akaike; BIC = Criterio bayesiano de Schwarz.

En otros estudios reportan que las variables relacionadas a la estimación de biomasa en componentes las variables que más se relacionan es el dap y la ht como los obtenidos por Navar et ál. (2001), en donde analizaron la biomasa total y por componentes en una plantación de cinco especies de pino con muestras de 25 árboles de *P. durangensis*, 19 de *P. cooperi*, 4 de *P. arizonica*, 2 de *P. cooperi* B, y 6 de *P. engelmanni*. Los individuos medidos cubrieron la mayor distribución dendrométrica. Los resultados estadísticos de los modelos probados para estimar biomasa foliar resultaron ser muy bajos R² de 0.38. Los modelos para estimar biomasa

de ramas para cada una de las especies presentaron R^2 de 0.66 y valores más altos en biomasa del fuste con R^2 de 0.83. En otro estudio reportado por Goya et ál. (1997) para la estimación de biomasa mediante modelos matemáticos con 22 árboles apeados en *Eucalyptus grandis* mostraron ajustes significativos en los modelos empleados por cada componente con coeficientes de determinación R^2 mayores a 0.83, los modelos empleados fueron de la forma $\ln B = a + b * \ln (\text{dap})^2 * \text{ht}$ para los diferentes componentes. En otro estudio similar, pero en *Hevea brasiliensis* Monroy y Navar (2004), estimaron la biomasa en componentes a partir de 20 árboles apeados, en promedio los componentes contenían el 73.9% de biomasa para fuste y 27.1 para ramas. Los modelos presentaron mejores ajustes similares en biomasa total y en el componente de biomasa en fuste con R^2 de 0.85 y menores para biomasa en ramas de 0.46, los modelos fueron de la forma: $B_f = 37.357 + 0.0134 * (\text{dap})^2 * \text{ht}$

En los suelos forestales que son más ricos en materia orgánica presentan mejores características fisiológicas de crecimiento de las plantas reflejadas por su rápido crecimiento y transformación a biomasa (Harold y Hocker 1984). De acuerdo con los modelos probados permiten estimar la biomasa en cada componente por árbol con el 87.59 % en fuste, 8.49 % en ramas y 3.90 % en follaje.

4.3.2 Biomasa en componentes para *Pinus oocarpa*

Los modelos alométricos generados para la estimación de biomasa en componentes de *Pinus oocarpa*, se modelaron a partir de un rango de dap 5.5 a 62.7 cm. Las variables que estuvieron más correlacionadas para la estimación de la biomasa del fuste fueron la edad, dap y htp. Para ramas y follaje se emplearon otras variables como el dcopa y la lcopa. De las ecuaciones seleccionadas, la variable dap fue el que mejor predijo la biomasa en los diferentes componentes, a pesar de que el uso de otras variables adicionales mejoró un poco el desempeño de los modelos.



Figura 11. Arquitectura de Pinus oocarpa

Los modelos generados que presentaron mayor R^2 y R^2 ajustados y menores AIC y BIC fueron los de tipo logarítmico (Cuadro 10), por lo general para la estimación de la biomasa en componentes, las variables regresoras como la de respuesta fueron transformadas con aplicaciones de raíz cuadrada y logaritmos.

En la mayoría de los estudios sobre biomasa aérea muestran que el fuste es el que tiene más biomasa, y por lo tanto mayor contenido de carbono en la madera en relación con los restantes componentes, esta relación puede deberse a un menor contenido de minerales y mayor contenido de lignina en la madera que en hojas y ramas (Gayoso y Guerra 2005). Sin embargo, estudios en Australia sobre *Eucalyptus* sp. y *Pinus radiata* mostraron relación contraria, es decir, los contenidos de carbono fueron mayores en hojas que en ramas leñosas, mientras el duramen presentó mayor contenido de carbono que en la madera de albura (Gifford 2000). Por otra parte, Segura (1997) no encontró diferencias en el contenido de carbono en cortes a diferentes alturas de fuste respecto a la albura y el duramen, es decir que el contenido de carbono no depende de la altura del fuste ni de la sección donde se tome la muestra, y no hay relación entre el contenido de carbono del fuste, ramas ni raíces en *Quercus*

costaricensis, atribuyendo esta característica a la densidad constante de la madera de esta especie.

Para la estimación de biomasa y carbono para diez especies nativas en Costa Rica, se concluyó que el incremento de la biomasa y carbono está influenciado por las condiciones del sitio y edad de la masa arbolada y que ésta influencia directamente con el crecimiento tanto en diámetro (dap) como en altura total (htp). Además, en la correlación de los modelos para estimar biomasa en los diferentes componentes el dap y htp fueron las variables que mejor explicaron el contenido de biomasa en cada componente para las diez especies estudiadas (Ugalde et ál. 1997).

En la estimación de biomasa en plantaciones de *Bombacopsis quinata* en Costa Rica, se encontró una alta correlación entre la biomasa foliar, de ramas y fuste con el dap, producto de la calidad del sitio, que influyó en el crecimiento rápido de la especie presentando una densidad de la madera de 0.33 g/cm^3 en la base del árbol. Para esta especie, el contenido de biomasa de ramas representó entre 25 y 45% de biomasa total (aérea), mientras que el fuste representó entre el 55 y el 75% del total, los incrementos de biomasa en follaje como en ramas se deben a la composición y estructura de copa, y también estuvieron estrechamente correlacionados con el dap y la altura total (Pérez y Kanninen 2002).

Con relación al almacenamiento de biomasa y carbono en bosques tropicales en San Carlos Nicaragua Moraes (2001), reportó mayor contenido de biomasa en fustes en árboles menores a 10 cm de dap que en árboles mayores a 10 cm, estos últimos mantienen mayor biomasa en ramas que los árboles pequeños, debido a que los árboles de menor diámetro tienen por lo general menor copa debido a la fuerte competencia por luz en los primeros años de desarrollo.

Cuadro 10. Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa de componente para *Pinus oocarpa*

Modelo	R ²	R ² -A	CME	AIC	BIC
Fuste					
$Bf^{1/2} = -7.2468 + 0.7148 * dap + 0.3603 * htp$	0.98	0.98	3.75	383.59	393.63
$Bf^{1/2} = -7.2699 + 0.6701 * dap + 0.3334 * htp + 0.2447 * dcopa$	0.98	0.98	3.57	379.84	392.39
$\log(Bf) = -1.67 + 0.21 * \log(edad) + 1.947 * \log(dap) + 0.821 * \log(htp)$	0.99	0.99	0.01	215.88	203.32
$\log(Bf) = -1.6775 + 2.1263 * \log(dap) + 0.8724 * \log(htp)$	0.99	0.99	0.01	212.95	202.91
$\log(Bf) = -1.3840 + 2.6981 * \log(dap)$	0.98	0.98	0.01	159.05	151.55
Ramas					
$Br^{1/2} = -1.3476 + 0.1472 * dap + 0.6175 * dcopa$	0.87	0.87	1.17	281.10	293.70
$Br^{1/2} = 1.9280 + 0.6221 * dcopa + 0.1908 * dap - 0.0007 * (dap)^2$	0.85	0.85	3.83	386.51	399.11
$\log(Br) = -1.5462 + 1.6364 * \log(dap) + 0.9706 * \log(dcopa)$	0.91	0.91	0.05	-19.83	-9.78
$\log(Br) = -1.662 + 1.52 * \log(dap) + 0.85 * \log(dcopa) + 0.37 * \log(lcopa)$	0.91	0.91	0.05	-21.44	-8.88
Follaje					
$Bfo^{1/2} = 0.7136 + 0.0732 * dap + 0.2774 * (dcopa)$	0.84	0.83	0.98	261.56	271.70
$\log(Bfo) = -0.7260 + 0.9231 * \log(dap) + 0.8676 * \log(dcopa)$	0.85	0.85	0.03	-44.17	-34.13
$\log(Bfo) = -0.72 + 0.94 * \log(dap) - 0.023 * \log(htp) + 0.86 * \log(dcopa)$	0.85	0.85	0.03	-42.18	-29.63

R² = Coeficiente de determinación; R²-A = coeficiente de determinación ajustado; CME = Cuadrado medio del error; AIC = Criterio de información de Akaike; BIC = Criterio bayesiano de Schwarz.

De acuerdo con los modelos alométricos generados se encontraron valores de ajuste mejor para fuste y para ramas, y menores para follaje. Para el componente fuste se pueden utilizar los cinco modelos para estimar la biomasa en el fuste, estos modelos estuvieron seleccionados de acuerdo con los mejores criterios estadísticos, además de que las variables utilizadas en el modelo alométricos fueron significativas con previas transformaciones, las dos primeras con transformación a raíz cuadrada en la variable de respuesta, mientras que en las tres restantes se le aplicó transformaciones logarítmicas tanto a las variables de respuesta como las regresoras: $\log(Bf) = -1.6775 + 2.1263 * \log(dap) + 0.8724 * \log(htp)$, al combinar las variables *dap* y *htp* la ecuación ajusta mejor los datos de biomasa de fuste en función de estas variables, la ecuación explica un 99% de la variabilidad de los datos con criterios bajos en AIC = 212.95 y BIC = 202.91. De los cinco modelos presentados para la estimación de biomasa puede elegirse cualquiera de éstas, por los altos coeficientes de determinación y criterios bajos de AIC y BIC con respecto a los modelos probados.

Con respecto a la estimación de biomasa en ramas mediante modelos alométricos, se presentan cuatro modelos con mejores criterios estadísticos de ajuste. Al igual que el fuste las

variables que estuvieron correlacionadas fueron el dap, dcopa y lcopa, estas se les aplicó una transformación logarítmica tanto en la variable regresora como en la variable de respuesta. Para la estimación de biomasa en ramas se observa que la mayoría de los parámetros de regresión del modelo presentan valores positivos, comenzando con el primer parámetro con valor negativo, como se muestra en el siguiente modelo de tipo logarítmico: $\log(\text{Br}) = -1.5462 + 1.6364 * \log(\text{dap}) + 0.9706 * \log(\text{dcopa})$, además de presentar coeficientes R^2 y R^2 ajustado de 0.91 y un AIC = -12.44 y BIC = - 8.88 respecto a los demás modelos, bajo estos resultados es recomendable utilizar los modelos que utilizan el dap, lcopa y dcopa para estimar la biomasa de ramas.

Para la estimación de biomasa en follaje se puede utilizar la ecuación de tres entradas (dap, htp, dcopa), $\log(\text{Bfo}) = -0.72 + 0.94 * \log(\text{dap}) - 0.023 * \log(\text{htp}) + 0.86 * \log(\text{dcopa})$ con coeficiente de determinación R^2 y R^2 ajustado de (0.85). No obstante para utilizar estos modelos se requiere medir la htp y dcopa las cuales pueden estar sujetas a error de medición debido a la presencia de varios estratos dentro del bosque y en muchos casos la copa de los árboles no es completamente uniforme o de tipo cilíndrico, por lo que se recomienda cuando realicen mediciones en esta variable se tome la información en forma cruzada y obtener un promedio de diámetro de copa.

4.3.3 Biomasa en componentes para Quercus sp.

La estimación de biomasa en componentes de *Quercus sp.* se realizó a partir de árboles derribados considerando en los componentes de fuste, ramas y follaje. Las mediciones se realizaron a diferentes alturas debido a que esta especie en el fuste presenta mayor bifurcación tanto en fuste como en ramas (Figura 12). El principio consistió en medir diámetros a diferentes alturas y calcular el volumen de las diferentes secciones, para obtener un valor más exacto (Prodan et ál. 1997).



Figura 12. Arquitectura de Quercus sp.

A partir de la biomasa de componentes se ajustaron modelos que incluyeron variables como el dap, htp, dcopa y lcopa (Cuadro 11). Al igual que en otros estudios estas variables también han sido utilizadas para el desarrollo de ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa en especies tropicales, por ejemplo en plantaciones de *Tectona grandis* (Pérez y Kanninen 2002), en bosques naturales de *Quercus costarricensis* (Segura 1997) y en bosques naturales tropicales (Segura 1999). Algunos otros estudios han mostrado un considerable

rango de ecuaciones alométricas para bosques primarios y secundarios en los trópicos húmedos de Centroamérica.

De los modelos probados para estimar biomasa en fuste, el que mejor estima es el de tipo logarítmico con un R^2 y R^2 ajustado de 0.98 y bajos de valores de AIC y BIC. Tanto el modelo como los parámetros fueron significativos. Al comparar la biomasa estimada en función de la biomasa del fuste, con la biomasa real, los valores simulados se ajustan a la recta, indicando que los valores estimados están muy cerca de los valores reales. Para el componente ramas, se usaron modelos en función de las variables como el dap, dcopa y lcopa los cuales presentaron un R^2 de entre 0.88 y 0.92. El modelo que mejor explica la variabilidad de los datos fue de tipo logarítmico con valores de R^2 y R^2 ajustado de 0.92 y valores bajos en AIC y BIC con respecto a los modelos probados. De la misma forma tanto los modelos probados como los parámetros estimados fueron significativos, y que explican gran parte de la variabilidad de los datos.

El mejor modelo para estimar la biomasa en follaje se logró en función del dap y el dcopa, con transformación logarítmica tanto en la variable de respuesta como en las regresoras. Se obtuvo un R^2 y R^2 ajustado de 0.85 y menores valores tanto de AIC, como de BIC.

En forma general, los diferentes componentes de biomasa, fuste, ramas y hojas, contribuyen de forma diferente a la cantidad de biomasa total, debido a la propia alometría de las especies arbóreas. En el caso de la acumulación de biomasa del fuste, ésta se da en un período más largo y de forma continua en los primeros años, seguido por un periodo con una tasa de acumulación más lenta, hasta la fase de la madurez (Ewel 1981).

Cuadro 11. Estadísticos de ajuste de los modelos probados para la estimación de biomasa total para *Quercus* sp.

Modelo	R ²	R ² - A	CME	AIC	BIC
Fuste					
$Bf^{1/2} = 5.8817 + 1.0959 * dap + -1.6961 * htp - 0.0433 * (htp)^2$	0.97	0.96	7.67	220.31	229.23
$Bf^{1/2} = 1.1878 + 0.5026 * dap + 0.0093 * (dap)^2$	0.97	0.96	7.91	220.75	227.88
$\log(Bf) = -1.4620 + 2.3975 * \log(dap) + 0.4835 * \log(htp)$	0.98	0.98	0.01	-69.43	-62.29
Ramas					
$Br^{1/2} = -0.0326 + 0.1893 * dap + 0.1583 * htp$	0.88	0.88	1.77	154.95	162.09
$Br^{1/2} = -0.8146 + 0.4060 * dap - 0.0025 * (dap)^2$	0.88	0.88	1.78	155.07	162.20
$\log(Br) = -1.05 + 1.33 * \log(dap) + 0.30 * \log(dcopa) + 0.59 * \log(lcopa)$	0.92	0.91	0.03	-34.00	-25.08
$\log(Br) = -1.0347 + 1.7877 * \log(dap) + 0.2817 * \log(dcopa)$	0.91	0.91	0.03	-36.36	-25.22
Follaje					
$Bfo^{1/2} = 1.9788 + 0.0658 * dap + 0.4564 * htp + -0.0094 * (htp)^2$	0.85	0.84	0.49	99.34	108.26
$Bfo^{1/2} = 0.9148 + 0.0608 * dap + 0.0742 * htp + 0.0832 * dcopa$	0.80	0.80	0.62	109.52	118.45
$\log(Bfo) = -0.7042 + 1.0295 * \log(dap) + 0.6106 * \log(dcopa)$	0.85	0.85	0.03	-31.99	-24.86

R² = Coeficiente de determinación; R²-A = coeficiente de determinación ajustado; CME = Cuadrado medio del error, AIC = Criterio de información de Akaike; BIC = Criterio bayesiano de Schwarz.

4.4 Biomasa total y carbono almacenado en rodales de pino – encino

4.4.1 Biomasa en rodales con predominancia de *Pinus maximinoi*

La estimación de la biomasa total de los árboles individuales presentes en cada parcela fue obtenida a través de los mejores modelos alométricos generados por especie de *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *Quercus* sp. Para el cálculo de biomasa de los árboles de *Pinus maximinoi* se utilizó la ecuación: $Bt^{1/2} = - 6.8842 + 0.6823 * dap + 0.3551 * htp$. Las biomásas de otras especies fueron calculadas con el modelo alométrico utilizado para estimar biomasa total en *Quercus* sp., es decir $Bt^{1/2} = - 1.8912 + 0.2671 * htp + 0.4514 * dap + 0.0087 (dap)^2$, debido a su similitud en estructura vertical y horizontal. Una vez obtenida la biomasa total de cada árbol se aplicó la sumatoria de biomásas de cada parcela.



Figura 13. Rodal con dominancia de *Pinus maximinoi*

El número promedio de árboles por parcela de 1000 m² en rodales con predominancia de *Pinus maximinoi* el diámetro promedio fue de 27 cm, el número de árboles fue de 60 como mínimo y máximo de 108. Con respecto al área basal denota que los árboles ocupan en promedio 21 m²/ha con un error estándar de 1.22 y con un LI (95 %) de 18.86 y un LS (95 %) de 23.69. En promedio las 79 parcelas fijaron 161.97 Mg/ha para *Pinus maximinoi*. Para estas cantidades se calcularon intervalos de confianza al 95% (Cuadro 12). Los límites de intervalos de confianza para la estimación de biomasa total por hectárea, fueron calculados mediante las siguientes expresiones:

$$LIC = (Biomasa\ total\ estimada) * 10 \pm t_{1-\alpha/2} * \sqrt{Varianza\ total * 10^2}$$

$$LIC = 161970.6 - 1.9908 * \sqrt{(208674.96 + 1022.34^2) * 100}$$

$$LIC = 161970.6 - 1.9908 * \sqrt{1253853 * 100} = 139682.98$$

$$LIC = 161970.6 + 1.9908 * \sqrt{1253853 * 100} = 184257.50$$

Cuadro 12. Límites de intervalos de confianza para la estimación promedio por hectárea de biomasa total en radales con dominancia de *Pinus maximinoi*.

Especie predominante	Media (Mg/ha)	EE	LI (95%)	LS (95%)
<i>Pinus maximinoi</i>	161.97	11.19	139.68	184.26

Media = valor promedio de biomasa por hectárea; E.E. = Error estándar; LI (95%) = Límite inferior de biomasa por ha; LS (95%) = Límite superior de biomasa por ha.

Tres especies fueron responsables de la mayor acumulación de la biomasa total con el 97.8% en las 79 parcelas con presencia de 1186 individuos y dominancia de *P. maximinoi* (Cuadro 13). La mayor aportación de biomasa fue obviamente *P. maximinoi*, con 68% a la biomasa total. Luego le siguió *Quercus* sp. con 628 individuos y un aporte a la biomasa total del 23%. Por último, *Liquidambar styraciflua* con 209 individuos aportó el 3% de la biomasa total.

Cuadro 13. Especies principales presentes en las 79 parcelas que aportan más del 97% de la cantidad de biomasa acumulada

Especies	N	Biomasa Total (kg/parcelas)
<i>Pinus maximinoi</i>	1 186	113 774
<i>Quercus</i> sp.	628	39 168
<i>Liquidambar styraciflua</i>	209	5 246
<i>Cornus disciflora</i>	33	2 720
<i>Pinus chiapensis</i>	5	1 294
<i>Inga</i> sp.	34	346
<i>Arbutus xalapensis</i>	11	326
Palo blanco	17	227
Laurel	16	102
<i>Eritrina</i> sp.	7	99
<i>Erythroxylon mexicana</i>	4	54
<i>Diphysa robinoides</i>	5	34
Palo de gusano	7	28

N = Número de árboles totales en las 79 parcelas.

Usando el factor de conversión de biomasa aérea a carbono de 0.5, recomendado por el IPCC 1996, se tiene una estimación promedio de 80.98 Mg/ha para los bosques con dominancia de *Pinus maximinoi*. La parcela con mayor número de árboles por hectárea y con

mayor diversidad de especies, fue una parcela considerada como relicto, con edades promedio de los árboles dominantes de 35 años y con estructuras diamétricas en promedio con 32 cm; aquí se estimó el mayor valor de fijación de carbono (185 Mg/ha). Los espacios de mayor densidad y diversidad de especies son considerados como áreas relictos, pues el grado de disturbio por actividades antropogénicas es bajo ya que son áreas de reservas.

Con fines comparativos sobre almacenaje de carbono en los bosques de *Pinus cooperi* en Durango, México, Pimienta et ál. (2007) estimaron un valor promedio para fuste limpio de 51.12 Mg/ha, mayor valor al presentado por Domínguez et ál. (2007) en los bosques mixtos de *Pinus teocote* y *Pinus pseudostrobus* en el sur de Nuevo León con 45.18 Mg/ha. En otros estudios sobre la cuantificación de biomasa y el carbono fijado en bosques templados lluviosos en la región centro – sur de Chile mediante 269 árboles apeados de 12 especies arbóreas estimaron la biomasa y carbono en raíces, sotobosque, necromasa y hojarasca. La cantidad de carbono almacenado en los sitios de la Precordillera de los Andes presentaron una acumulación de 662.06 Mg/ha mayor que los de la Cordillera de la Costa con 423.83 mg/ha. El carbono acumulado en estos bosques es muy alto comparado con los registrados en la literatura para bosques tropicales y templados del hemisferio norte (Schlegel 2001).

La baja cantidad de carbono estimada en algunas áreas, puede justificarse por la baja densidad de la masa arbolada, en muchos casos resultado del aprovechamiento forestal que desde 1950 ha ocurrido bajo diferentes tratamientos silvícolas, en sus inicios de forma intensiva, removiendo en mayor cantidad los bosques primarios, sumándose actividades antropogénicas que han contribuido a modificar las estructuras de los rodales, provocando espacios abiertos destinados a la agricultura y la ganadería. Bajo este contexto, se puede argumentar que se ha perdido una gran cantidad de carbono almacenado, pero también se ha propiciado en menor escala en la regeneración natural de algunas áreas en donde han aplicado un sistema de manejo forestal adecuado lo que ha promovido aun más captura de carbono atmosférico.

Por lo general las masas arboladas en esta región están bajo estructura secundaria, debido a que los bosques primarios fueron aprovechados en décadas pasadas. Algunos autores hacen mención que un bosque secundario fija más carbono que un bosque primario porque tiene una mayor tasa de productividad primaria neta (Brown y Lugo 1990). Por otra parte la producción de biomasa y la capacidad de almacenamiento de carbono por las plantas es

determinada por las zonas de vida, los sitios, las especies y la etapa de desarrollo en la que se encuentre, por una parte, y por otra el uso de la tierra, el manejo y el grado de intervención que se le dé a los ecosistemas (Anderson y Spencer 1991).

La composición de un bosque secundario puede mantenerse relativamente estable por muchas décadas debido a la dominancia de un pequeño grupo de especies pioneras o heliófitas de larga vida, raras en los bosques maduros (Finegan 1996). Las condiciones de los sitios pueden favorecer la dominancia de ciertas especies de árboles (Poulsen 1996), lo que podría influir en la cantidad de biomasa de bosques de la misma edad dentro de una misma zona de vida, como en este estudio la dominancia de pinos y encinos.

4.4.2 Estimación de biomasa total por hectárea mediante modelos alométricos en rodales de *Pinus maximinoi*

Las estimaciones de biomasa a nivel de rodal se realizaron mediante modelos alométricos que consideraron variables como el área basal por hectárea (G), diámetro a la altura del pecho promedio del rodal (D), número de árboles por hectárea (N) y la altura total promedio (H). Seis modelos fueron los que mejor se ajustaron para estimar la biomasa por hectárea (Cuadro 14), obteniendo coeficientes de determinación R^2 entre 0.80 y 0.99. Todos los modelos y parámetros fueron significativos lo que ofrece modelos para la estimación de biomasa en función de las posibilidades y requerimientos de situaciones correctas.

*Cuadro 14. Ecuaciones de mejor ajuste presentadas para la estimación de biomasa total por hectárea en función de variables dendrométricas en rodales de *Pinus maximinoi**

Modelo	R²	R²-A	CME	P-valor
Bt/ha = 6.0103*G ^{1.0741}	0.99	0.99	4.20E+08	<0.0001
Bt/ha = 9.3059*G ² *H	0.80	0.80	6.84E+09	<0.0001
Bt/ha = 95398.6+5.9738*G ² *H	0.96	0.96	1.23E+09	<0.0001
Bt/ha = 0.6552*D ^{1.9116} *N ^{1.0859}	0.98	0.98	8.76E+08	<0.0001
Bt/ha = 6664.5+5295.9*G ^{1.1162} *H ^{-0.0170}	0.99	0.99	4.30E+08	<0.0001
Bt/ha = 0.3912*D ^{2.2553} *H ^{-0.3652} *N ^{1.1588}	0.98	0.98	8.15E+08	<0.0001

Bt/ha = Biomasa total por hectárea; D = diámetro promedio por hectárea; G = Área basal por hectárea; H = altura total; N = Número de árboles por hectárea; R² = Coeficiente de determinación; R²-A = coeficiente de determinación ajustado CME = Cuadrado medio del error; P-v= Probabilidad ($\alpha=0.005$).

El modelo que utilizó la variable área basal (G), mostró un alto coeficiente de determinación R^2 y R^2 ajustado de 0.99 de forma exponencial Bt/ha = 6.0103 * G^{1.0741}; las

variables D, N, y H también resultaron significativos en los modelos alométricos utilizados; a su vez éstas variables fueron importantes para estimar mediante regresiones la biomasa almacenada por hectárea. De acuerdo con estos resultados, la estimación de biomasa por hectárea mediante modelos alométricos facilitará aun más la cuantificación de biomasa y la estimación de carbono en estos ecosistemas ya que por lo general en los inventarios forestales con fines de manejo forestal la medición de estas variables es obligatorias para el análisis de la información de las masas arboladas tanto a nivel individual como por hectárea.

De acuerdo con las ecuaciones presentadas, se observa que las variables diámetro D, área basal G, altura total H y el número de árboles por hectárea N fueron significativos para estimar la biomasa por hectárea. Lo anterior se puede asociar con el hecho de que el incremento del D está influenciado por la densidad del rodal, por lo cual la variable G, refleja las condiciones del desarrollo del diámetro y N la acumulación del área basal, por esta razón están asociadas con el D como se muestran en los modelos en donde se obtuvieron coeficientes de determinación R^2 entre 0.96 a 0.99.

Para representar en una expresión gráfica los resultados de la regresión entre el área basal por hectárea y la biomasa por hectárea (Figura 14), se utilizó un modelo no lineal que resultó en la ecuación: $Bt/ha = 6.0103 * G^{1.0741}$. En el gráfico se puede observar cómo la variable biomasa total guarda una relación de tipo lineal, en la cual el incremento se da a medida que incrementa el área basal.

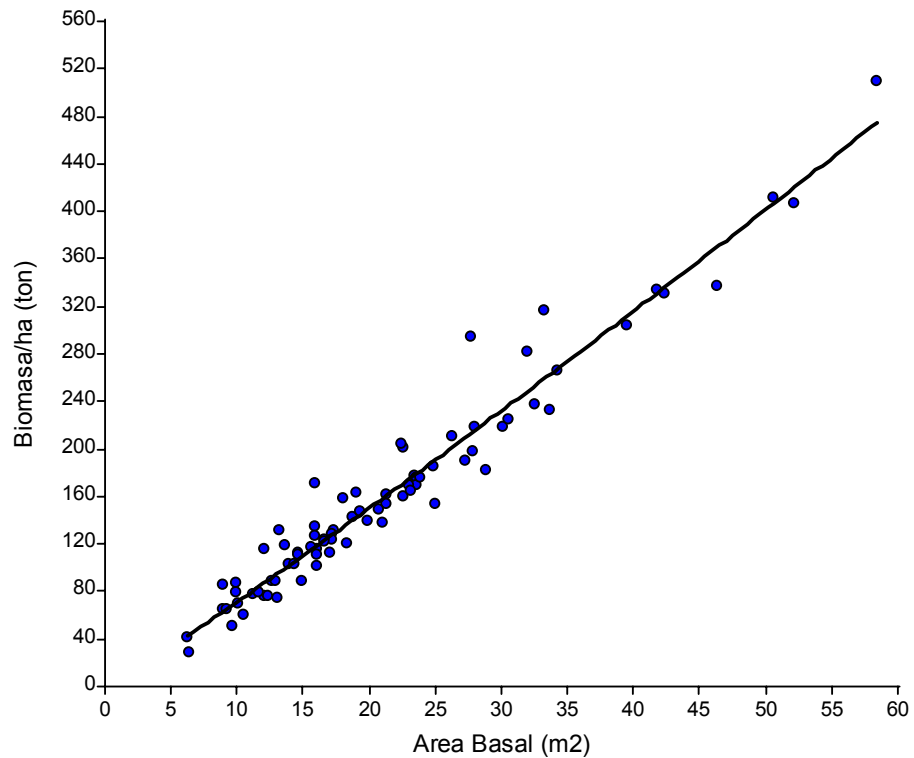


Figura 14. Relación alométrica de biomasa por hectárea en función del área basal para rodales de *Pinus maximinoi*.

4.4.3 Biomasa en rodales con predominancia de *Pinus oocarpa*

En los rodales de *Pinus oocarpa*, la segunda especie en importancia es *Quercus* sp. y hay escasa presencia de *Arbutus xalapensis*. Los suelos donde crecen estas especies no son muy productivos, en algunos sitios donde el contenido de materia orgánica es mayor se presentan asociaciones con *Pinus maximinoi*, *Liquidambar styraciflua* y *Pinus oocarpa*. La altura de los bosques guarda una estructura uniforme con un promedio de 23 m incrementando más su crecimiento en el diámetro. En áreas donde los suelos son más productivos los árboles alcanzan alturas de 33 m, y diámetros de 30 y 60 cm.



Figura 15. Estructura vertical y horizontal de un rodal con dominancia de *Pinus oocarpa*.

El cálculo de la biomasa total de los árboles individuales en parcelas dominantes de *Pinus oocarpa*, se realizó mediante los mejores modelos alométricos generados para estimar la biomasa total de árboles individuales en *P. maximinoi*, *P. oocarpa* y *Quercus* sp. En *P. maximinoi* se utilizó el modelo: $Bt^{1/2} = - 6.8842 + 0.6823 * dap + 0.3551 * htp$, en *Pinus oocarpa* el modelo alométrico fue: $Bt^{1/2} = - 4.99 + 0.42 * htp + 0.57 * dap + 0.0027 * (dap)^2$ y las biomásas de otras especies fueron calculadas con el modelo alométrico utilizado para *Quercus* sp.: $Bt^{1/2} = -1.8912 + 0.2671 * htp + 0.4514 * dap + 0.0087 (dap)^2$. Una vez obtenidas las biomásas totales de cada árbol se aplicó la sumatoria de biomásas de cada parcela.

En promedio las 79 parcelas fijaron 142.23 Mg/ha de biomasa, obteniendo un promedio de 74.25 Mg/ha de carbono. Este resultado de biomasa y carbono estuvo en función del número de árboles promedio por hectárea, en este caso fue de 256 por hectárea, el área basal promedio fue de 18.24 m²/ha con un error estándar de 0.81, un LI (95 %) de 16.63 y un LS (95 %) de 19.84. El diámetro promedio por especie fue de 29 cm y la altura de 17 m. para *Pinus oocarpa* y en *Quercus* sp. presentó diámetros promedios de 18 cm y 9 m de altura. Se calcularon intervalos de confianza al 95% para la estimación de biomasa total por hectárea, estos intervalos fueron calculados mediante las siguientes expresiones:

$$LIC = (Biomasa\ total\ estimada) * 10 \pm t_{1-\alpha/2} * \sqrt{Varianza\ total * 10^2}$$

$$LIC = 142225.7 - 1.9908 * \sqrt{(138983.61 + 721.37^2) * 100}$$

$$LIC = 142225.7 - 1.9908 * \sqrt{659358.29 * 100} = 126060.23$$

$$LIC = 142225.7 + 1.9908 * \sqrt{659358.29 * 100} = 158391.17$$

Cuadro 15. Límites de intervalos de confianza para la estimación de biomasa total por hectárea en rodales con dominancia de *Pinus oocarpa*.

Especie predominante	Media (Mg/ha)	EE	LI (95%)	LS (95%)
<i>Pinus oocarpa</i>	142.23	8.12	126.06	158.39

Media = valor promedio de biomasa por hectárea; E.E. = Error estándar; LI (95%) = Límite inferior de biomasa por ha; LS (95%) = Límite superior de biomasa por ha.

La cantidad de biomasa y carbono almacenado en estos rodales puede verse favorecida debido a la mayor densidad de la madera estimada para *P. oocarpa* fue de 0.56 gr/cm³ en la sección A y con 0.65 gr/cm³ para *Quercus* sp. lo que las hace especies más pesadas.

Según los resultados obtenidos de biomasa en rodales de *P. oocarpa*, tres especies fueron las que más aportaron a la biomasa total con el 99.36% (Cuadro 16), la predominancia de *P. oocarpa* aportó el 49.63%, seguida *Quercus* sp. con el 34.21 y *P. maximinoi* con el 15.52%.

Cuadro 16. Especies principales presentes en las 79 parcelas que aportan más del 99.35 % de la cantidad de biomasa acumulada

Especies	N	Biomasa total (kg/parcelas)
<i>Pinus oocarpa</i>	692	473 159
<i>Quercus</i> sp	1004	364 022
<i>Pinus maximinoi</i>	314	288 585
<i>Liquidambar styraciflua</i>	8	276
<i>Arbutus xalapensis</i>	4	89
Sony	1	6

N = Número de árboles totales presentes en las 79 parcelas

Los resultados presentados en un estudio sobre acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea en un bosque denso de *Pinus oocarpa* en Cabañas, Honduras, mostraron que la acumulación de biomasa aérea en clases diamétricas inferior (10 cm) fue de 1.68 Mg/ha, para la clase diamétrica media de (36 cm) fue de 1.52 Mg/ha y para la clase diamétrica superior (60 cm) fue de 0.84 Mg/ha. El total de biomasa aérea acumulado fue de 57.13 Mg/ha. Con respecto al carbono acumulado en la clase diamétrica inferior (10 cm), este fue de 0.87 Mg/ha, para la clase diamétrica media (36 cm) fue de 0.78 Mg/ha y para la clase diamétrica superior (60 cm) fue de 0.43 Mg/ha. El total de carbono acumulado fue de 29.59 Mg/ha (Alberto y Elvir 2005).

Otros resultados reportan que en bosques primarios y secundarios en Colombia Orrego y del Valle (2001), en 53 parcelas de muestreo de 1000 m² en bosques primarios y 77 parcelas de 500 m² en bosques secundarios para un área de 7.15 ha estimaron biomasa y carbono almacenado en biomasa aérea y necromasa, biomasa subterránea y del suelo, sus resultados mostraron que la biomasa aérea total promedio 233.44 Mg/ha, mientras que los bosques secundarios obtuvieron valores cinco veces inferiores a los del bosque primario con 45.82 Mg/ha. En cuanto a la necromasa total, esta alcanzó 14.77 Mg/ha en los bosques primarios y 7.31 Mg/ha en secundarios. La biomasa radical en los bosques primarios fue de 56.38 Mg/ha y en bosques secundarios 20.48 Mg/ha. Para los primeros 30 cm del suelo registraron 99.24 Mg/ha y 93.60 Mg/ha para los primarios y secundarios.

Los resultados obtenidos en los bosques densos de Cabañas Honduras son inferiores con respecto a los obtenidos en este estudio con 74 Mg/ha de carbono almacenado, los de biomasa y carbono pueden ser afectados por el crecimiento libre que presentan algunos

árboles cuando las densidades son bajas, en el casos del género *Pinus* tienden a crecer más en su copa, árboles con suficiente espacio de crecimiento interceptan más luz, producen más carbohidratos y fijan mayor cantidad de nutrimentos en el fuste que en árboles con copas parcialmente sombreados y con crecimiento denso o con mayor competencia por espacio y nutrimentos del suelo (Aguilar 2002). Las relaciones lineales entre al área foliar del rodal y las características de crecimiento de los árboles demostraron que el crecimiento en área basal, volumen y la tasa de asimilación neta decrecían considerablemente cuando la densidad de copas aumentaba (Pérez y Kanninen 2002).

4.4.4 Estimación de biomasa total por hectárea mediante modelos alométricos en rodales de Pinus oocarpa

La biomasa a nivel de hectárea se estimó mediante modelos no lineales alimentados por variables como el diámetro promedio/ha (D), altura total promedio/ha (H), área basal por hectárea (G) y número de árboles por hectárea (N), estas variables se utilizaron para las pruebas de regresión para poder estimar la biomasa total por hectárea (Bt/ha), (Cuadro 17). Los resultados fueron significativos, se obtuvieron altos coeficiente de determinación en cinco modelos, con R^2 entre 0.96 y 0.98. El más bajo se obtuvo utilizando como variables regresoras el área basal y la H, obteniendo un R^2 de 0.77; sin embargo la mayoría de las ecuaciones presentadas evidencian estimar la biomasa total por hectárea de forma más exacta con solo contar con el área basal por hectárea.

Cuadro 17. Ecuaciones presentadas para la estimación de biomasa total por hectárea en función de variables dendrométricas en rodales de *Pinus oocarpa*.

Modelo	R ²	R ² -A	CME	P-valor
Bt/ha = 7113.7*G ^{1.0312}	0.97	0.97	7.27E+08	<0.0001
Bt/ha = 15.2706*G ² *H	0.77	0.77	5.47E+09	<0.0001
Bt/ha = 91297.3+8.3035*G ² *H	0.96	0.96	1.01E+09	<0.0001
Bt/ha = 16.7616*D ^{1.8016} *H ^{0.9730}	0.96	0.96	1.03E+09	<0.0001
Bt/ha = 2891.6+4428.4*G ^{0.9791} *H ^{0.2255}	0.98	0.98	6.47E+08	<0.0001
Bt/ha = 19.4756*D ^{1.5312} *H ^{0.2929} *N ^{0.9595}	0.96	0.96	1.00E+09	<0.0001

Bt/ha = Biomasa total por hectárea; D = diámetro promedio por hectárea; G = Área basal por hectárea; H = altura total; N = Número de árboles por hectárea; R² = Coeficiente de determinación; R²-A = coeficiente de determinación ajustado CME = Cuadrado medio del error; P-v= Probabilidad ($\alpha=0.005$).

De acuerdo con las ecuaciones presentadas, se puede destacar que efectivamente el área basal y la altura total en pie predicen con mayor exactitud la biomasa total por hectárea, lo cual presentan el mayor coeficiente de determinación R² de 0.98, sin embargo con la ecuación exponencial Bt/ha = 7113.7*G^{1.0312} se puede obtener una grafica ilustrativa que muestra el comportamiento lineal entre área basal y el contenido de biomasa total por hectárea. Esta recta permite estimar el valor y (biomasa por hectárea) para un valor x. El modelo ajustado puede ser usado con fines predictivos, pues con el solo hecho de utilizar la variable G se puede obtener de forma exacta la biomasa total por hectárea (Figura 16).

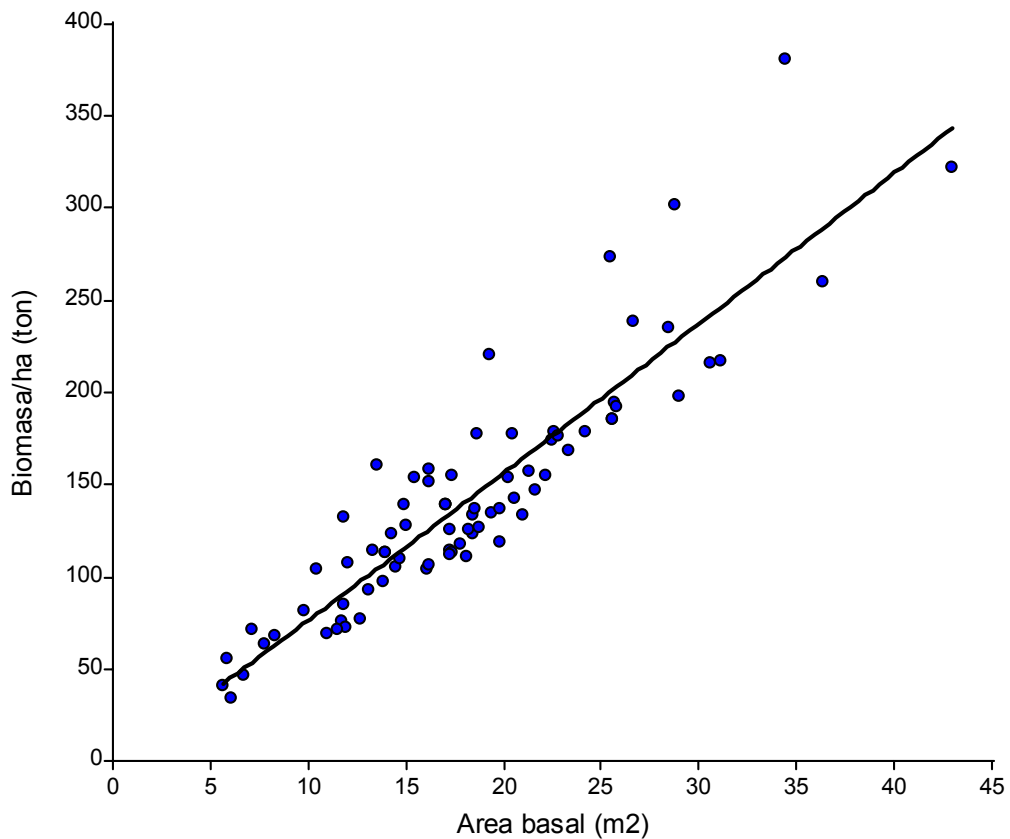


Figura 16. Relación alométrica de biomasa por hectárea en función del área basal para rodales de Pinus oocarpa.

Se probaron algunas regresiones en componentes de biomasa de ramas y follaje en árboles individuales con variables como G, N y H. Los resultados no fueron significativos, por lo que se puede deducir que a cualquier punto en la etapa de crecimiento de un rodal la composición en la estructura de ramas y follaje requerida individualmente para el máximo crecimiento del árbol es independiente de estas variables para la producción de biomasa. Esto significa que no se puede esperar que un árbol en un rodal tenga las mismas condiciones que tendría estando aislado. Por citar algunos estudios en plantaciones han determinado que la cantidad de follaje en un árbol depende del tamaño de ramas además la cantidad de biomasa en ramas y follaje está asociado con variables como el diámetro a la base de la copa, el ancho de la copa y la simetría de la copa (Pérez 1998).

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La homogeneidad de la estructura vertical y horizontal de los árboles de pino – encino, permitió mediante el sistema de muestreo y metodología empleada obtener modelos confiables ya que los datos dendrométricos utilizados cubrieron la variación presente para las distintas variables tanto en árboles individuales como a nivel de parcela.

El análisis de los datos de la densidad básica de la madera mostró diferencias entre especies, siendo la de mayor densidad *Quercus* sp., con un valor de 0.65 grs/cm³ clasificándose como madera pesada. La especie de pino presentaron menores valores, *Pinus oocarpa*, presentó 0.55 grs/cm³ y *Pinus maximinoi* 0.49 grs/cm³. Estos valores fueron los usados para la estimación de la biomasa en fustes.

Los modelos alométricos generados para cuantificar biomasa a nivel de árboles individuales y a nivel de parcela fueron similares en las tres especies. Los modelos lineales y no lineales para la estimación de biomasa fueron en general función de variables como el dap, htp y el dcopa. Estas variables son fáciles de medir en el campo y en el caso de los bosques de pino – encino de Chiapas son requeridas en los programas de manejo forestal sostenible.

Debido a los buenos ajustes encontrados para los modelos alométricos presentados se pueden realizar estimaciones confiables de la cantidad de carbono almacenado.

Las parcelas con predominancia de *Pinus maximinoi*, con 81 Mg/ha almacenaron más carbono que las de *Pinus oocarpa* (71 Mg/ha). Si bien estas estimaciones se lograron a partir de la estimación de biomasa aérea de árboles individuales, también es posible obtener estimaciones a partir de áreas basales y de altura promedio de las parcelas.

Los intervalos de confianza obtenidos en este trabajo para los dos tipos de ecosistemas permitirán proponer escenarios futuros de almacenaje de carbono bajo la dinámica de los bosques manejados. Estas estimaciones podrán ser usadas en programas de mitigación de gases de efecto invernadero en corto, mediano y largo plazo.

Debido a la obligatoriedad de llevar registros a nivel de parcela para poder realizar explotaciones en los bosques de pino – encino en la zona de Chiapas se cuenta con información que puede ser usada para el cálculo del carbono almacenado. Esto permitirá

retroalimentar los programas de manejo forestal sostenible y brindará información para la aplicación de tratamientos silvícolas y redistribuir la biomasa tanto en los árboles maduros como en la regeneración natural.

Si bien todos los modelos para estimación de biomasa presentados en este trabajo tuvieron un buen ajuste y por lo tanto pueden ser usados para la predicción de biomasa aérea, se recomienda usar aquellos modelos que contengan variables regresoras de fácil medición. Esto traerá como consecuencia un mayor número de árboles y o parcelas analizadas con el consecuente aumento de la precisión en las estimaciones.

Se recomienda utilizar la metodología presentada en este trabajo para el cálculo de la varianza de la estimación de biomasa ya que esta brinda intervalos de confianza más realistas al tener en cuenta no solo la varianza de muestreo si no también la varianza de las estimaciones de biomasa obtenidas por medio de modelos alométricos.

Para complementar la información sobre carbono en rodales de pino, se recomienda realizar estudios relacionados con carbono en el suelo y en materia orgánica, lo que permitirá que la suma de estos datos nos dé una información más completa del almacenaje de carbono que guardan los ecosistemas de pino – encino.

Se recomienda realizar mediciones de la productividad de los sitios mediante un análisis de anillos de crecimiento que presentan las especies de pino y correlacionarlos con la productividad de biomasa.

La información generada en este estudio provee un marco para el análisis, consulta y apoyo para todas aquellas personas e instituciones interesadas en el manejo forestal sostenible y el desarrollo de investigaciones que tengan como objetivo la cuantificación de biomasa y carbono arriba del suelo con fines de valoración y pago por servicios ecosistémicos en bosque de pino – encino.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta M, M; Vargas H, J; Velázquez M, A; Etchevers B, J.D. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36: 725 – 736.
- Aguilar S. 2002. Estimación de biomasa aérea y carbono almacenado en el área de aprovechamiento anual 2001. Uaxactún, Flores, Peten. Tesis Ing. For. Centro Universitario del Petén. Universidad de San Carlos de Guatemala, GT. 61 p.
- Aguirre, O. A. y Zepeda E. M. 1985. Estimación de índices de sitio para *Pinus pseudostrabus* Lindl. De la región de Iturbide Nuevo Leon. *Ciencia Forestal*. 10(56). México D. F.
- Alberto D; Elvir JA. 2005. Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de *Pinus oocarpa* en bosques naturales de Cabañas, La Paz. *Tatascán* 17(2):1-12.
- Amaralis, L. P. G. 2002. Estudio preliminar para la estimación de biomasa y cuantificación de carbono para *Vochysia guatemalensis*, *Calophyllum brasiliense* y *Cybistax donnell-smithii* en bosques naturales de Guatemala. Tesis Licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala, GT. 75 p.
- Anderson J; Spencer, T. 1991. Carbon, nutrient and water balances of tropical rain forest ecosystem subject to disturbance. MAB – Digest/FAO-Unesco. 55 p.
- Araujo TM; Higuchi N; Carvalho Jr.; JA de. 1999. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical forest site in the state of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management* 177: 43 – 52.
- Arrega, W. 2002. Almacenamiento del carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de la Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 111 p.
- Arteaga, M. B. y Pérez C. A. 2001. *Pinus maximinoi* H. Moore. Una especie prometedor para las plantaciones forestales comerciales en el trópico. *Foresta Veracruzana*. 3(002). Universidad Veracruzana, Xalapa México. Pp 63 – 70.
- Brown, S. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4):381-902.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forest. Department of Natural Resources and Environmental Sciences. University of Illinois, Urbana, Illinois, USA.

- Brown, S; Lugo, AE. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forest and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14(3):161 - 187
- Brown, S; Lugo, AE. 1990. Tropical secondary forest, *Journal of Tropical Ecology* 6: 1-32.
- Carmean, WH. 1975. Forest site quality evaluation in the United States. *Adv. Agro.* 27:209-269.
- Castaños, J. 1962. Evaluación de la calidad de estación del *Pinus patula* en el N. de Oaxaca. Instituto Nacional de Inventarios Forestales México, Boletín Técnico, 2. 32 p.
- Ciesla, W. 1996. Cambio Climático, bosques y ordenación forestal: una visión de conjunto. Roma, IT, Estudios FAO Montes 126. 147 p.
- Cordero, J; Boshier, DH. (Eds). 2003. Árboles de Centroamérica. Un manual de extensionistas. OFI/CATIE. Oxford Forestry Institute, Oxford, RU. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 1079 p.
- Chatterjee S; Price, B. 1991. Regression analysis by example. 2 ed. John Wiley & Sons, Inc. N.Y. 277 p.
- Chaturveni, A. 1994. Sequestration of atmospheric carbon in India's forest. *Ambio* 23: 461.
- Chave, J; Andalo, C; Brown, S; Cairns M.A; Chambers, J.Q; Eamus, D; Fölster, H; Fromard, F; Higuchi, N; Kira, T; Lescure, JP; Nelson, BW; Ogawa, H; Puig, H; Riéra, B; Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forest. *Ecosystem Ecology. Oecologia* 145: 87 – 99.
- Cubero, J; Rojas S. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de *Gmelina arborea* Roxb. *Tectona grandis* L. F. y *Bombacopsis quinata* Jacq. En los cantones de Hojanca y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis de licenciatura en ciencias forestales. Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. 95 p.
- Dalaney, M; Brown, S; Lugo, A; Torres, L; Quintero, N. 1997. The distribution of organic carbon in major components of forest located in five zones of Venezuela. *Journal Tropical Ecology* 13:697 – 708.
- De Jong B; Masera, O; Hernández, T. 2003. Opciones de captura de carbono en el sector forestal. En: J. Martínez (editora). El cambio climático en México. 2003. Mx. En prensa.

- De la Fuente, E. 1998. Crecimiento y predicciones del rendimiento de rodales coetáneos de *Pinus rudis* Endl. de pueblos Mancomunados, Ixtlán Oaxaca. Tesis doctoral en ciencias. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 155 p.
- Dominguez, CG; Aguirre, OA; Jiménez, P; Villalón HM. 2007. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Madera y Bosques* 13(1) 35 – 46 pp.
- Ewel, J. 1971. Biomass changes in early tropical sucesion. *Turrialba* 21:110-112.
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Estudio FAO / Montes. 22/1. Roma. 130 p.
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1993. Forest resources assessment 1990 tropical countries. FAO Forestry paper 112. FAO, Rome. 59 p.
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 1998. Terms and Definitions. FAO Forest Resources Assessment Programme, Working Paper 1. Roma, Italia.
- FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). 2002. Evaluación de los recursos forestales mundiales Informe Principal, Estudio FAO: Montes No. 140, Roma, Disponible en www.fao.org/forestry/site/fra2000report/sp.
- Finegan, B. Patter and process in neotropical secondary forest: the first 100 years of succession. *Trends in Ecology and Evolution* 11(3):119 – 124.
- FWPRDC (Forest and Wood Products Research and Development Corporation). 1996. Environmental properties of timber. Brisbane, Australia.
- Furnival, GM. 1961. An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science* 4(7): 337 – 341.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koopen (Adaptado para la República Mexicana). Offset Larios, México 222 p.
- Gasparri, I; Manghi, E. 2004. Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas (en línea). Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable. consultado el 3 de septiembre de 2008. Disponible en [ht//www.ambiente.gov.ar/archivos/web/biomasa_carbono.pdf](http://www.ambiente.gov.ar/archivos/web/biomasa_carbono.pdf)
- Gayoso, AJ; Guerra, CJ. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque* 26(2): 33 – 38.

- Giffor, R. 2000. Carbon contents of above-ground tissues of forest and woodland trees. Canberra: Australian Greenhouse Office, National Carbon Accounting System, Technical Report N° 22. 17 p.
- González, O, MA. 2006. Plan municipal participativo para la integración de criterios de conservación de la biodiversidad: Mapa, Estrategias de manejo del OCT. Estrategias a nivel municipal Coapilla, Chiapas. Escala 1: 5 000. Corredor Biológico Mesoamericano.
- Gower, S; Reich, B; Son, Y. 1993. Canopy dynamics and aboveground production for five tree species with different leaf longevities. *Tree Physiol* 12(4):327-45.
- Goya, J. F; Franji J. L; Dalla F. T; Marco M. A; Larocca F. 1997. Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el Ne de la provincia de Entre Ríos. XII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Consultado el 3 de octubre de 2008. Disponible en: <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/forestacion/biblos/pdf/1997/71%20III%20goya2%2097%20faltan%20dib.pdf>
- Harold, W; Hocker, Jr. 1984. Introducción a la Biología Forestal. AGT Editor, S.A. México D. F.. 446 p.
- Herrera, B; Alvarado, A. 1998. Calidad de sitio y factores ambientales en bosques de Centro América. *Agronomía Costarricense* 22(1): 99-117.
- Herrera, B; Campos, JJ; Finegan, B; Alvarado, A. 1999. Factors affecting site productivity of a Costa Rican secondary rain forest in relation to *Vochysia ferruginea*, a commercially valuable canopy tree species. *Forest Ecology and Management* 118:73 – 81.
- Higuchi, N; Santos, J; Ribeiro, R; Miente, L; Biot, Y. 1998. Biomassa de parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra – firme da Amazônia brasileira. *Acta Amazonica* 28:153– 166.
- Hipkins, M. 1984. Photosynthesis. In *physiogy*. Malcolm b. Wilkin (De). Gral Britain. P. 219.
- Husch, B. 2001. Estimación del contenido de carbono en los bosques. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile.
- Honorato S. J. A. y Fuentes L. M. 2001. “Propiedades Físico-mecánicas de la madera de cinco especies de encino del estado de Guanajuato”. *Ciencia Forestal en México*. 26(90) México. 12-26 pp.

- INEGI, (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 1984. Carta de uso del suelo y vegetación escala 1:250,000. Hoja Tuxtla Gutiérrez. México.
- InfoStat, 2008. Manual del Usuario. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, AR. 334 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). 1996. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Workbook and Reference Manual Revised Versión 1996. UNEP, WMO. Módulo (1, 4, 5).
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). 2001. Climate Change 2001: Glosario de términos. Anexo B. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O.R. Davidson, R. Swart, y J. Pan (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK y, US, 752 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). 2007. Resumen Técnico. *In* Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK y NY.
- Jiménez P. J; Aguirre C. O; Treviño G, E; Domínguez C, A. 1998. Desarrollo de un sistema matemático para la elaboración de tarifas de volumétricas de especies arbóreas. *Madera y Bosques* 4(2): 67 – 77 p
- Kimball, J. 1982. Biología. 4ª Edición. Fondo Educativo Interamericano, S.A.
- Loguercio, GA; Defossé, G. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y reducción de lenga *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl) Krasser, en el SO del Chubut, Argentina. Centro de Investigación y Extensión Forestal. Chubut, Argentina. 11 p.
- López, D; Soto, L; Jiménez, G; Hernández, S. 2003. Relaciones alométricas para la predicción de biomasa forrajera y leña de *Acacia pennatula* y *Guazuma ulmifolia* en dos comunidades del norte de Chiapas, México. *Interciencia* 28(006):334-339 p.
- Martínez, M. 1948. Los pinos mexicanos. 2 edición. Ediciones Botas. México. 361 p.
- Masera, O. 1995. Desforestación y degradación forestal en México. Documento de trabajo 19. Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, A.C. Pátzcuaro, Michoacán, México. 50 p.

- Masera, O; Cerón, A; Ordóñez, A. 2001. Forestry mitigation options for Mexico: Finding synergies between national sustainable development priorities and global concerns. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. MX (6): 291-312.
- Meza, J. D; Vargas H. J; López H.J; Vaquera H H; Borja R. A. 2005. Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura en *Pinus patula* Schl et Cham. *Universidad Autonoma Indigena de México* 1 (2): 305 -324 p.
- Mirov, NT. 1967. *The Genus Pinus*. New York 1967. Ronald Press Co. 602 p.
- Monroy, R. C, y Navar C. J. J. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasilensis* Mull. Arg. En Veracruz México. *Madera y Bosques*. Xalapa Veracruz. 10(002). 29 – 43 p.
- Mohren, G; Goldewijk, K. 1990. CO₂ Fix: A dynamic model of the CO₂ fixation in forest stands. Research Institute for Forestry and Urban Ecology, Wageningen, Report NR. 624.
- Moraes, C. 2001. Almacenamiento y fijación de carbono de bosques secundarios en el municipio de San Carlos, Nicaragua Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE.
- Morrissey, A; Justus, J. 1998. *Global Climate Change*. Committee for The National Institute for the Environment, Washington D. C.
- Nájera, L. J. A. Vargas A. Z; Méndez G. J y Graciano L. J. 2005. Propiedades físicas y mecánicas de la madera en *Quercus leata* Liemb. De el Salto Durango. *Universidad Indígena de México*. Ra Ximhai 1(3) El Fuerte Sinaloa, México. 559 – 576 p.
- Navar, J; González N; Graciano J. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango. México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia Chile. pp 1 – 12.
- Nelson, BW; Mezquita, Pereira, JLG; Souza, SAG de; Batista, GT; Couto, LB. 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management* 117:149 – 167.
- Niembro, R. 1986. *Mecanismos de reproducción sexual de los pinos*. Ed. Limusa. México D. F, México. 130 p.
- Nixon, K. C. 1993. The genus *Quercus* in México. Chapter 16: 447-458. *In: Ramamoorthy, T. P., R. Bye, A. Lot and J. Fa (eds.). Biological Diversity of Mexico: Origins and distribution*. Oxford University Press. New York. 812 pp.

- OCIC, (Oficina Costarricense de Implementación Conjunta). 1998. Actividades de implementación Conjunta. San José, Costa Rica. 6 p.
- Onyekwelu, J.C., 2004. Above-ground biomass production and biomass equations for even-aged *Gmelina arborea* (ROXB) plantations in south-western Nigeria. *Biomass & Bioenergy*, vol. 26/1: 39 – 46
- medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales del 18 al 20 de octubre del 2001. Valdivia Chile.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1992. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Declaración de Río
- Orrego, SA; del Valle JI. 2001. Existencia y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios y secundarios de Colombia. Simposio internacional
- Ordóñez, A. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F.
- Ordóñez, A. 1999. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México D.F.
- Pennington, T; Sarukhán, J. 1998. Árboles tropicales de México. Universidad Autónoma de México y Fondo de Cultura Económica. México D. F, México. 521 p.
- Pérez, D. 1998. Desarrollo de escenarios de crecimiento con base en la relación de la composición y la estructura de copa en la productividad en plantaciones de *Tectona grandis* y *Bombacopsis quinata* en Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 182 p.
- Pérez, D. y M. Kanninen. 2002. Heartwood, sapwood y bark content and wood specific gravity of young and mature *Tectona grandis* trees in Costa Rica. *Silva Fennica* 37(1):45-54.
- Perry, Jr. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, Oregon, USA. 563 p.
- Pimienta, TD; Domínguez, CG; Aguirre, CO; Javier, HF; Jiménez, PJ. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco en Pueblo Nuevo Durango. *Maderas y Bosques* 13(1):35 – 46.
- Post, W; Emanuel, W; Zinke, P; Stangenberg, A. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298:156-159.

- Poulsen, AD. 1996. Species richness and density of ground herbs within a plot of lowland rainforest in the north – west Borneo. *Journal of Tropical Ecology* 12:177 – 190.
- Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P. 1997. *Mensura Forestal*. San José, Costa Rica, IICA/GTZ. 561 p.
- Ramírez, M. C; Garay J. D. A; Reyes S. W. 2004. Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de la especie *Pinus oocarpa* provenientes de aclareos en la plantación Emilio Menotti Sposito, de 35 años de edad con fines protectores Mérida, Edo. Mérida. Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana* 35. 21 – 36 p.
- Rodríguez, LR; Jiménez, PJ; Aguirre, CO; Treviño, GE. 2006. Estimación del carbono almacenado en bosques de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL IX(2)*: 179 - 187
- Romahn de la V, C.F. 1999. *Relascopía; una técnica de medición forestal*. 2a. Ed. Corr. y Aument. División de Ciencias Forestales, UACH, Chapingo, MX. 136 p.
- Rojo, M. G; Jasso M. J; Vargas H. J; Palma L. D; Velázquez M. A. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule *Hevea brasiliensis* Mull. Arg. En el estado de Oaxaca México. *Agrociencia* 39. 449 – 456 p.
- Rzedowski, J. 1978. *Vegetación de México*. LIMUSA, México, DF. 432 p.
- Salazar, G J; Vargas H, JJ; Jasso, MJ; Molina G, JD; Ramírez, HC; López, UJ. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de pino en edades tempranas. *Maderas y Bosques* 5(2), 1999. 19 – 34.
- Sanquetta, CR; Watzlawick, LF; Arce, JE. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda* en el sur del estado de Paraná, Brasil. *Revista Forestal del sur argentino*. Consultado el línea 9 de octubre 2008. www.ciefap.org.ar/patagoniaforestal/2002-1/biomassa_pinus.htm
- SARH-SFF. 1994. *Inventario Nacional Forestal Periódico 1992-1994*. México, D.F. 122 p.
- Schlegel, B. 2001. Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo siempreverdes. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales Valdivia Chile. 12 p.
- Semarnat, 2007. *Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2007-2012*, PNMARN. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. 170 pp.

- Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costarricensis*, en un bosque de altura en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis. UNA, Heredia, Costa Rica. 147 p.
- Segura, M. 1999. Valoración de los servicios de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación Cordillera Volcánica Central. Tesis Mag Sc. Turrialba, CR, CATIE. 119 p.
- Segura, M; Kanninen, M. 2002. Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. *In* Orozco, L; Brumer, C. (Eds.). Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central. Turrialba Costa Rica, CATIE. p. 202-216. (Serie Técnica. Manual Técnico No. 50).
- SmartWood. 2003. Informe de evaluación de certificación SmartWood, para el ejido Coapilla, Chiapas, México. Informe final. 127 p.
- Smith, D. M. 1954. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. U.S. Forest Service. Forest Products Laboratory. Report 2014. Wisconsin, USA. 8 p.
- Spurr, S. H. y Barnes, B. V. 1982. Ecología Forestal. A. G. T. Editor. 3ª edición. México, D. F. 690 p.
- Torelli, N. 1982. “Estudio promocional de 43 especies forestales tropicales mexicanas”. Programa de Cooperación Científica y Técnica México- Yugoslavia 1980-1982. SARH. México. 73 p.
- UGALDE ARIAS, L. Editor. 1997. Resultados de 10 años de investigación silvicultural del proyecto MADELEÑA en Costa Rica. Serie Técnica, Informe Técnico no. 287. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 162 p.
- UNEP, (United Nations Environment). 2001. Climate Change. INFORMATION SHEETS Switzerland, UNEP, UNFCCC. Information Kit: 62 p.
- UNFCCC, (United Nation Framework Convention on Climate Change). 1998. Cuarto periodo de sesiones de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Conversaciones de Buenos Aires relativas al protocolo de Kioto, para promover la reducción de emisiones. Comunicado de prensa. 2 – 13, de noviembre de 1998. Buenos Aires Argentina. Disponible en <http://www.cop4.org/sp/index>

- Valencia, M., S. y Vargas H. J.J. 1997. Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*. 3(1): 81-87.
- Vallejo, A; Rodríguez, P; Martínez, C; Hernández, P; de Jong, B. 2007. Guía para el diseño de proyectos MDL forestal y de bioenergía. CATIE, Turrialba, CR. 253 p.
- Vidal, A; Benítez, JY; Rodríguez, J; Carlos R; Gra, H. 2001. Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var *caribaea* en la EFI. La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho* 11. 60-66.
- Watzlawick, L; Sanquetta, C; de Mello, A; Arce, J. 2001. Ecuaciones de biomasa aérea en plantaciones de *Araucaria angustifolia* en el sur del estado de Paraná, Brasil. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Cl. 2001.
- Zamora, C. M. E. y Mendizábal H. L. C. 2004. Variación del peso específico de una prueba de procedencias. Progenie de *Pinus caribaea*. Mor. Var. Hondurensis. Barr y Golf. En la región de los Tuxtlas Veracruz, México. *Foresta Veracruzana*. 6(002): Xalapa Veracruz México. 41 – 46 p.
- Zavala, F. 1990. Los encinos mexicanos: un recurso desaprovechado. *Ciencia y Desarrollo* pp. 43-51.
- Zepeda, B. E. M. y Rivero B. 1984. Construcción de curvas anamórficas de índices de sitios. Ejemplificación del método de la curva guía. *Ciencia Forestal*. 9(51). 3 – 38

ANEXOS

Anexo I: Planilla para relevar las características físico-geográficas y ecológicas para la estimación de la biomasa arriba del suelo.

MUNICIPIO:	PARAJE:	FECHA:
No DE SITIO:	ALTITUD:	LATITUD:
LONGITUD:	PENDIENTE;	EXPOSICIÓN:

MEDICIONES DENDROMÉTRICAS DEL ÁRBOL A DERRIBAR

ESPECIE:		DAP (1.30 m):	
EDAD:	HTP:	HTD:	
HIC:	DCOPA:	LCOPA:	
PFOLLAJE:	PRAMAS:	PMFOLLAJE:	
PMFUSTE 1:		PMFUSTE 2:	

MEDICIONES DEL FUSTE DEL ÁRBOL DERRIBADO

No DE TROZA	DMAYOR (m)	DMENOR (m)	LONG TROZA (m)
TOCÓN			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

Anexo II: Planilla para relevar la información dendrométrica de la parcela de 1000 m²

I Características ecológicas de la parcela:

No ARBOL	ESPECIE	DAP (cm)	ALTURA (m)	EDAD (años)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				

No ARBOL	ESPECIE	DAP (cm)	ALTURA (m)	EDAD (años)
24				
25				
26				
27				
28				
29				
30				
31				
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38				
39				
40				
41				
42				
43				
44				
45				
46				

Anexo III. Rangos ambientales para la aplicación de los modelos alométricos generados para la estimación de biomasa total y por componentes en el ejido Coapilla Chiapas, México.

Características ambientales	Resultados
Altura sobre el nivel del mar (msnm)	1634
Pendiente (%)	23-45
Topografía	Meseta
Precipitación (mm)	1400 - 1600
Clima: cálido sub-húmedo con lluvias de verano	Am (f), Aw0(w)
Coordenadas geográficas	17° 07' 50", 93° 09' 30"
Pedregosidad (%)	Nov-24
Geología: Rocas sedimentarias	calizas y lutitas