

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS

ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO
PARA *Pinus oocarpa* Schiede, *P. maximinoi* H.E. Moore y *P. caribaea* Morelet. var *hondurensis* EN
ALGUNOS BOSQUES NATURALES DE GUATEMALA

TESIS

PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA
DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR

ANA LORENA CÓRDOVA LOPEZ

En el acto de investidura como

INGENIERA AGRÓNOMA
EN
RECURSOS NATURALES RENOVABLES

En el grado académico de

LICENCIADA

Guatemala, febrero de 2002

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR MAGNÍFICO
Ing. Agr. EFRAÍN MEDINA GUERRA

JUNTA DIRECTIVA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO
VOCAL I
VOCAL II
VOCAL III
VOCAL IV
VOCAL V
SECRETARIO

Ing. Agr. EDGAR OSWALDO FRANCO RIVERA
Ing. Agr. WALTER ESTUARDO GARCÍA TELLO
Ing. Agr. MANUEL DE JESÚS MARTÍNEZ OVALLE
Ing. Agr. ERBERTO RAÚL ALFARO ORTIZ
Prof. ABELARDO CAAL ICH
Br. AXEL AURELIANO HERRERA PÉREZ
Ing. Agr. EDIL RENE RODRÍGUEZ QUEZADA

Guatemala, febrero de 2002

Señores
Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala


De conformidad con lo que establece la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a su consideración el trabajo de tesis titulado:

**ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO
PARA *Pinus oocarpa* Schiede, *P. maximinoi* H.E. Moore y *P. caribaea* Morelet. var *hondurensis* EN
ALGUNOS BOSQUES NATURALES DE GUATEMALA**

presentado como requisito previo a optar al título de Ingeniera Agrónoma en Recursos Naturales Renovables en el grado académico de Licenciada.

Esperando que el presente trabajo merezca su aprobación.

Atentamente,


Ana Lorena Córdova López

ACTO QUE DEDICO

A

- DIOS** Porque sin Él nada existe y porque nunca me abandona.
- MIS PADRES** José Ricardo A. Córdova Avendaño y
María del Rosario López de Córdova
Como un regalo para todo el amor, dedicación y sacrificios, porque este logro también es suyo.
- MI HERMANA** Evelyn Lisseth
Por su amor, paciencia y consejos.
- MI HERMANO** Richard Forbes
Con mucho amor.
- MIS TÍAS** Zoila, Ange, Deli, Carmen, Mandy
Con respeto y cariño.
- MI AHIJADA** Kimberly Paulina Rivera Cotto
Con cariño especial
- MIS ÁNGELES** Mynor, Rita, Jenny, Pablo, José Alfredo y Christian
Por siempre recordarme que existe el Cielo
- MIS AMIGOS** Muy especialmente a Juan Pablo Guzmán, Guillermo Ruano, Glenda Lee, Lety Maddaleno, Benjamín Maldonado, Luis Felipe León, Gabriela y Francisco Enríquez, Eira y Jeffrey Rivera, Mónica y Carlos Gordillo, Ligia Monterroso, Gerardo Cáceres, Nancy Lee, Alejandra Paiz, Dante Batres, Ricardo Jordán, Lissets Pérez V., Julio y Manolo García, Vivian Maddaleno, Mónica García, Mónica, Angela y Gabriela Mazariegos, Melvin Morales y Edgar Rodríguez
- A MIS AMIGOS Y COMPAÑEROS UNIVERSITARIOS** Carmen Dorigoni, Edgar Bámaca, William Arreaga, Jorge Mario Monzón, Rodrigo Arriaga, Luis Montes, José Antonio López, Juan Pablo Marín, Oscar Avalos, Jorge Mario Vargas, Oscar Medinilla, Juan Carlos Rosito, Miguel Martínez, David Mendieta, Nick Estrada, Rubén Zaldaña, Gerson Alvarado, Estuardo Wöhlens, José María Aguilar, Francis Moscoso, Zindy García, Mariela Meléndez, Pablo Toledo, Karín Calderón, Raúl Calderón

TESIS QUE DEDICO

A

Mi bella Guatemala, país de la eterna primavera

Mi querido colegio, Instituto Belga Guatemalteco

La gloriosa y tricentenaria Universidad de San Carlos de Guatemala

La Cincuentenaria Facultad de Agronomía

Mis amigos y compañeros de trabajo de la Unidad de Fomento y Desarrollo Forestal del INAB y del Proyecto Banco de Semillas Forestales – BANSEFOR –

Todos los trabajadores que colaboraron en la fase de campo

A cada una de las personas que contribuyeron durante mi proceso de formación

AGRADECIMIENTOS

Un pequeño reconocimiento al esfuerzo y dedicación de las personas que participaron en la elaboración y corrección de la presente investigación.

Al Instituto Nacional de Bosques – INAB –, en especial al personal de la Unidad de Fomento y Desarrollo Forestal y Subregiones de dicha institución, quienes colaboraron directamente con el trabajo.

Al Proyecto de Investigación Forestal del INAB, por el apoyo al estudiante investigador.

Al Ing. Agr. Guillermo Ruano, por todo su apoyo, su compañía, cariño y consejos.

Muy especialmente a mis asesores personales Ing. Agr. Edwin Cano, Ing. Agr. Roderico Estrada Muy y Dr. Edwin Castellanos por el tiempo, la paciencia y la orientación para la realización de la investigación.

A la Inga. Agra. Glenda Lee por el trabajo compartido a lo largo del camino.

A las fincas y trabajadores que hicieron posible la fase de campo.

Al Área de Ciencias de la Facultad de Agronomía de la USAC, sus laboratoristas y a la Universidad del Valle de Guatemala, a través del Dr. Edwin Castellanos, quienes apoyaron la fase de laboratorio.

A los evaluadores del trabajo de tesis: Ing. Agr. Josué Morales, Ing. Agr. Eddy Vanegas, Ing. Agr. Eugenio Orozco e Ing. Agr. Mario Alberto Méndez.

A mis padrinos de graduación: Lic. José Ricardo Córdova, Ing. Agr. Jorge Mario Vargas, Ing. Agr. Oscar Medinilla e Ing. Agr. Guillermo Ruano.

A todas las personas que se me escapa nombrar y que de una u otra forma estuvieron presentes en el desarrollo de este trabajo.

Ana Lorena Córdova López
Carné 95 10123

CONTENIDO

	Página
INDICE DE FIGURAS	iii
INDICE DE CUADROS	iv
RESUMEN	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
3. MARCO TEÓRICO	3
3.1 MARCO CONCEPTUAL	3
3.1.1 Conceptos importantes sobre bosque y carbono	3
3.1.2 Efecto de Invernadero y Cambio Climático	4
3.1.3 Protocolo de Kyoto	5
3.1.4 Biomasa	5
3.1.5 Biomasa y la fijación de carbono por las plantas	6
3.1.6 Características generales de las especies a estudiar	7
3.1.6.a <i>Pinus oocarpa</i>	7
3.1.6.b <i>Pinus maximinoi</i>	8
3.1.6.c <i>Pinus caribaea</i>	9
3.2 MARCO REFERENCIAL	11
3.2.1 Características de los sitios de muestreo	11
3.2.2 Estudios realizados relacionados con secuestro de carbono en bosques	13
3.2.3 Situación actual de la Convención sobre Cambio Climático	16
3.2.3.a La Convención Marco sobre Cambio Climático	16
3.2.3.b Reunión de Bonn (COP6 Bis)	18
3.2.3.c Principales opciones de mitigación de emisiones en los Recursos Forestales.....	18
3.2.3.d Necesidades Nacionales	18
3.2.3.e La COP7	18
3.2.4 Situación del Mecanismo de Desarrollo Limpio en Guatemala	19
3.2.4.a Los aspectos positivos del MDL.....	19
3.2.4.b Los aspectos negativos	19

3.2.4.c	Experiencias en presentación de proyectos	19
3.2.4.d	Opiniones/comentarios acerca del MDL	19
3.2.4.e	Sobre proyectos de MDL	20
4.	OBJETIVOS	21
5.	METODOLOGÍA	22
5.1	Selección de especies y Áreas de estudio	22
5.2	Selección de rodales	22
5.3	Tipo de muestreo	22
5.4	Unidades de muestreo y selección de los árboles	23
5.5	Tamaño de la muestra	23
5.6	Variables	24
5.6.1	Variables primarias	24
5.6.2	Variables derivadas	24
5.7	Toma de datos en el campo	24
5.8	Trabajo de laboratorio	26
5.9	Análisis de resultados	27
5.10	Análisis estadístico	29
5.10.1	Regresión lineal múltiple	29
5.10.2	Procedimiento lógico de análisis (STATISTICA®)	30
5.10.3	Factor de expansión de biomasa	32
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
6.1	Modelos para estimación de biomasa	33
6.2	Estimación de Carbono	44
6.3	Factor de expansión de biomasa	46
7.	CONCLUSIONES	48
8.	RECOMENDACIONES	50
9.	BIBLIOGRAFÍA	51
	APÉNDICE	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.	Titulo	Página
1	Comparación de ecuaciones para estimación de biomasa en <i>P. maximinoi</i>	35
2	Comparación de ecuaciones para estimación de biomasa en <i>P. oocarpa</i>	36
3	Comparación de ecuaciones para estimación de biomasa en <i>P. caribaea</i>	37
4	Relación DAP – Biomasa para <i>P. maximinoi</i>	38
5	Relación DAP – Biomasa para <i>P. oocarpa</i>	39
6	Relación DAP – Biomasa para <i>P. caribaea</i>	39
7	Relación Altura – Biomasa para <i>P. maximinoi</i>	40
8	Relación Altura – Biomasa para <i>P. oocarpa</i>	41
9	Relación Altura – Biomasa para <i>P. caribaea</i>	41
10	Correlación de biomasa real contra estimada para <i>P. maximinoi</i>	42
11	Correlación de biomasa real contra estimada para <i>P. oocarpa</i>	43
12	Correlación de biomasa real contra estimada para <i>P. caribaea</i>	43
13	Correlación de biomasa real contra estimada para las tres especies	44
1A	Muestreo del árbol	54

INDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Titulo	Página
1	Características de los sitios de muestreo.....	12
2	Ecuaciones de regresión para estimar biomasa en bosques tropicales.....	13
3	Carbono fijado y carbono liberado en los dos escenarios	15
4	Categorías diamétricas a muestrear.....	23
5	Códigos para identificar especies.....	25
6	Códigos para identificar cada componente del árbol	25
7	Modelos de regresión para estimar biomasa generados por este estudio	33
8	Estimación de biomasa comparando distintos modelos de estimación para <i>P. maximinoi</i>	35
9	Estimación de biomasa comparando distintos modelos de estimación para <i>P. oocarpa</i>	36
10	Estimación de biomasa comparando distintos modelos de estimación para <i>P. caribaea</i>	37
11	Contenido de Carbono en cada especie por clases diamétricas	45
12	Factor de expansión de biomasa por especie	47
1A	Carbono en toneladas por árbol <i>Pinus maximinoi</i>	56
2A	Carbono en toneladas por árbol <i>Pinus oocarpa</i>	56
3A	Carbono en toneladas por árbol <i>Pinus caribaea</i>	57
4A	Factor de expansión de biomasa para <i>Pinus maximinoi</i>	58
5A	Factor de expansión de biomasa para <i>Pinus oocarpa</i>	58
6A	Factor de expansión de biomasa para <i>Pinus caribaea</i>	59

ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO PARA *Pinus maximinoi* H.E. Moore, *P. oocarpa* Schiede y *P. caribaea* Morelet, var *hondurensis* EN BOSQUES NATURALES DE GUATEMALA

BIOMASS AND CARBON ESTIMATION FOR *Pinus maximinoi* H.E. Moore, *P. oocarpa* Schiede y *P. caribaea* Morelet, var *hondurensis* IN GUATEMALAN NATURAL FORESTS

RESUMEN

Una de las medidas a tomar para la mitigación del calentamiento global es la conservación, manejo y repoblación de áreas boscosas, ya que estas funcionan como sumideros naturales de Carbono. De esta manera, los países que poseen bosques necesitan cuantificar el Carbono que éstos pueden fijar y ofrecerlo al mercado internacional, como un servicio ambiental. En Guatemala existen muy pocos estudios realizados en cuanto a estimación de biomasa y cuantificación de Carbono, los que existen ha utilizado modelos generados para condiciones de países asiáticos. Sin embargo, no existen modelos que sean específicos para ninguna especie presente en el país y tampoco generados en las condiciones de Guatemala.

Con la realización de esta investigación se ha pretendido generar ecuaciones locales de regresión que permitieran estimar la biomasa del árbol a partir de variables de fácil medición (Diámetro a la altura de pecho –DAP– y altura del árbol en pie); y cuantificar el carbono presente en *Pinus oocarpa*, *P. maximinoi* y *P. caribaea*, en base a la biomasa total.

Las especies elegidas para el estudio se encuentran son prioritarias para el Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) del INAB. Las áreas en que se realizó el estudio se eligieron en base a la distribución natural de las especies y en las cuales existieran licencias de manejo forestal vigentes. Se seleccionaron rodales en base a las especies de interés, donde hubieran árboles de todas las edades y clases diamétricas; que tuvieran manejo similar, crecimiento normal con densidad media. Por tratarse de una metodología destructiva, fue necesario que los rodales tuvieran licencia de aprovechamiento vigente. Se utilizó muestreo selectivo, las unidades de muestreo fueron cada uno de los árboles elegidos en base a los rangos de diámetro propuestos. Para cada una de las especies se muestrearon 20 árboles, haciendo un total de 60.

En campo se midió DAP y altura del árbol en pie, se derribó y se midió diámetros a cada dos metros. Cada uno de los árboles se desramó y se deshojó completamente, las hojas y ramas se pesaron por separado para tener el peso fresco total de hojas y ramas. Se tomaron tres muestras de cada componente: fuste, ramas, ramillas y hojas, para llevar a laboratorio.

A las muestras de fuste se les hizo análisis de densidad. Las muestras se colocaron en hornos de convección para el proceso de secamiento, se anularon los pesos a diario hasta que se estabilizaron y se tuvo el peso seco.

Con los datos de campo y laboratorio se procedió a hacer los cálculos pertinentes y obtener biomasa total por encima del suelo, por árbol. Se introdujo biomasa total por encima del suelo como variable dependiente, altura en pie y DAP como variables independientes, a un programa de análisis llamado STATISTICA. El programa proporcionó un modelo para cada una de las especies, así también se introdujeron los datos de las tres especies para generar un modelo para coníferas.

Los modelos generados fueron exponenciales y presentaron coeficientes de determinación (R^2) bastante altos, esto indica que dichos modelos son capaces de explicar una buena proporción de la variación en la estimación de biomasa total por encima del suelo. Los modelos son: para *Pinus maximinoi*, Biomasa = $e^{(3.193157 + 0.072731 \text{ DAP} + 0.023289 \text{ Altura})}$, con un R^2 del 92%; *Pinus oocarpa* Biomasa = $e^{(3.98316 + 0.048111 \text{ DAP} + 0.00011 \text{ Altura} - 0.00555 \text{ Altura}^2)}$, con un R^2 del 99%; y por último *Pinus caribaea*, Biomasa =

e $(0.53223 + 0.314869 \text{ DAP} - 0.01499 \text{ Altura} - 0.00357 \text{ DAP}^2)$ y su R^2 es del 98%. Además, se introdujeron los datos de las tres especies para crear

un modelo general: Biomasa = e $(1.737076 + 0.147573 \text{ DAP} + 0.082182 \text{ Altura} - 0.00148 \text{ Altura}^2 - 0.00115 \text{ DAP}^2)$, que obtuvo un R^2 del 95%.

Se generó un factor de expansión de biomasa (FEB) para cada especie: para *P. maximinoi* de 1.19, *P. oocarpa* de 1.22 y para *P. caribaea* de 1.12. Este factor relaciona biomasa total y biomasa de fuste. El FEB sirve para incluir la biomasa que se acumula en el follaje, la cual no se toma en cuenta en los inventarios forestales.

También se calculó el carbono fijado en los árboles muestreados. La fracción de Carbono presente en cada árbol es poco significativa para presentar proyectos, para ello es necesario tener medida de una parcela y densidad media de la misma para inferir el carbono que fijado por hectárea. En el documento se presenta un ejemplo de estimación de carbono por hectárea utilizando datos ideales en un área con manejo.

Los modelos generados en el presente estudio pueden ser utilizados para estimar biomasa en las especies estudiadas, así como otras coníferas, tomando en cuenta que fueron generados en áreas y condiciones específicas y no abarcando toda el área de distribución de las especies. Además, el modelo general ha sido creado con datos de solamente tres especies de las aproximadamente catorce que existen en el país.

En futuros estudios relacionados, se recomienda incluir además de las variables DAP y altura, la variable edad del árbol como variable predictora.

También sería interesante recalcular las estimaciones de Carbono en los Bosques de Guatemala, estudio realizado por Pedro López, utilizando ecuaciones generadas en el presente estudio.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que las consecuencias del efecto invernadero son graves para la vida sobre la Tierra, el proponer soluciones para contrarrestarlo ha sido preocupación de muchos expertos en los últimos años, un reflejo de ello son los convenios firmados en el Protocolo de Kyoto (31). En dichos convenios los países desarrollados o de economías en transición (identificados como los principales emisores de gases de efecto invernadero -GEI-) se han comprometido a financiar proyectos que disminuyan, eviten o contrarresten las emisiones de GEI. Los países en vías de desarrollo, que poseen recursos naturales capaces de ofrecer servicios ambientales, deben proponer estos proyectos para ser vendidos al primer grupo de países.

Uno de los servicios ambientales que más interés ha despertado a nivel internacional es la compra – venta de créditos de carbono, que es uno de los principales gases de efecto invernadero. La venta de carbono principalmente se hace a través de formaciones boscosas, ya que, como es sabido, las plantas utilizan el carbono como materia prima en la fotosíntesis y por tanto fijan un buen porcentaje del carbono que existe en la atmósfera. Al ver las masas forestales como sumideros de carbono, se hace necesario cuantificar el carbono que estas fijan y tener índices confiables para contribuir a que los proyectos sean comerciables a nivel internacional.

Con este trabajo se ha pretendido generar modelos matemáticos de regresión múltiple que permitan estimar la biomasa existente en los árboles de un bosque y cuantificar el carbono en los mismos, esto para especies y condiciones propias de Guatemala. Se toman en cuenta tres de las principales especies de coníferas para el Programa de Incentivos Forestales (PINFOR): *Pinus oocarpa* Schiede, *P. maximinoi* H.E. Moore y *P. caribaea* (Morelet.) var *hondurensis*, con las que este programa pretende trabajar comercialmente en los próximos veinte años.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El efecto invernadero es un fenómeno natural, en el cual algunos gases de la atmósfera (gases de efecto invernadero: GEI), cumplen la función de retener el calor necesario para el desarrollo de la vida en la superficie terrestre. Los GEI absorben parte de los rayos del Sol que llegan a la superficie de la Tierra y al ser reflejados, una buena cantidad de radiación se retiene, conservando las temperaturas en rangos necesarios para que la vida se mantenga tal y como la conocemos. Las actividades humanas han alterado este y otros procesos naturales, ya que la concentración de gases de efecto invernadero aumenta de manera considerable, alterando los ciclos biológicos y la vida se puede ver amenazada (13).

La quema de combustibles fósiles y la fabricación de cemento son las principales causas de que la concentración de dióxido de carbono (uno de los gases de efecto invernadero) aumente en la atmósfera, impidiendo que la radiación solar que ha de ser liberada, abandone la superficie. Esto trae como consecuencia el calentamiento del planeta y un cambio de los ciclos hídricos, este proceso es conocido como cambio climático. Se han predicho, aunque con incertidumbre, las consecuencias que el cambio climático puede traer consigo, entre ellas inundaciones debidas al descongelamiento de los polos, sequías, elevación de la temperatura, pérdida de la biodiversidad, propagación de plagas y enfermedades, todas ellas atentando contra las actividades humanas y la vida en general.

Es de interés mundial el disminuir la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera y mitigar sus efectos sobre el calentamiento global. Existen convenios por medio de los cuales los países desarrollados se han comprometido a financiar proyectos de mitigación ambiental, sobre todo en los países en vías de desarrollo que aún cuentan con recursos naturales para llevar a cabo este tipo de proyectos. Es por ello que desde hace algunos años, varios países han iniciado estudios para inventariar sus recursos naturales y por tanto, los servicios ambientales que de ellos pueden derivar y ofrecer para la venta.

Una de las medidas a tomar para la mitigación del calentamiento global es la conservación, manejo y repoblación de áreas boscosas, ya que estas funcionan como sumideros naturales de carbono. De esta manera, los países que poseen bosques necesitan cuantificar el carbono que éstos pueden fijar y ofrecerlo al mercado internacional, como un servicio ambiental. En Guatemala existen muy pocos estudios realizados en cuanto a estimación de biomasa y cuantificación de carbono, los que existen han utilizado modelos generados para condiciones de países asiáticos, ya que son los únicos existentes en la actualidad.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 MARCO CONCEPTUAL

3.1.1 CONCEPTOS IMPORTANTES SOBRE BOSQUE Y CARBONO

A continuación se presentan algunas definiciones importantes y que han sido adoptadas para los fines del presente estudio.

- 3.1.1.1 **Bosque:** Ecosistema compuesto predominantemente por árboles y otra vegetación leñosa que crecen juntos de manera más o menos densa (21). Los bosques se definen como un terreno con formaciones naturales o plantadas de árboles cuyas copas cubren más del 10 por ciento del mismo y con un área mayor de 0.5 ha, siendo su uso primario el forestal (3).
- 3.1.1.2 **Bosques naturales:** Áreas forestales en las que están presentes las características principales y los elementos claves de los ecosistemas naturales, tales como la complejidad, estructura y diversidad (21). Se entiende como un ecosistema natural aquel que no ha sido influenciado por el hombre, en el caso de un bosque natural, se refiere a bosques en los cuales, en general, se conservan las características originales del mismo, diferenciándolo de las plantaciones de árboles creadas por el hombre (19).
- 3.1.1.3 **Bosques Primarios:** Un ecosistema caracterizado por la abundancia de árboles maduros, relativamente no afectados por actividades humanas. Los impactos humanos en estas áreas forestales han sido normalmente limitados a niveles bajos de caza artesanal, pesca y cosecha de productos forestales y, en algunos casos, a niveles bajos de densidad, de agricultura migratoria con periodos de descanso prolongados. Tales ecosistemas son llamados "maduros", "viejos", o "bosques vírgenes" (21).
- 3.1.1.4 **Bosques Secundarios:** Los ecosistemas que se regeneran luego de disturbios sustanciales (inundaciones, fuegos, cambios en el uso del suelo o extracciones de madera extensivas e intensivas), caracterizados por la escasez de árboles maduros y por la abundancia de especies pioneras, al igual que por rebrotes en el sub piso densos y plantas herbáceas. Aunque los bosques secundarios generalmente llegan a su punto máximo de acumulación de biomasa dentro de un ciclo de aprovechamiento, la transición hacia un bosque primario usualmente requiere de varias rotaciones de distintas duraciones, dependiendo de la severidad del disturbio original. La transformación irreversible de los suelos subyacentes y del ciclo de nutrientes ocasionados por el uso crónico o intenso pueden hacer imposible el retorno al bosque primario original (19 y 21).
- 3.1.1.5 **Carbono Potencial:** Se refiere al carbono máximo o carbono real que pudiera contener un determinado tipo de vegetación, asumiendo una cobertura total y original (21).

- 3.1.1.6 **Carbono Real:** Se refiere al carbono almacenado considerando las condiciones actuales de cobertura en cuanto al área y el estado sucesional: bosque primario, bosque secundario, potrero (21).
- 3.1.1.7 **Carbono Fijado:** Se refiere al flujo de carbono de la atmósfera a la tierra producto de la recuperación de zonas (regeneración) previamente deforestadas, desde pastizales, bosques secundarios hasta llegar a bosque climax. El cálculo por lo tanto está definido por el crecimiento de la biomasa convertida a carbono (21).
- 3.1.1.8 **Carbono no Emitido:** Se refiere al carbono salvado de emitirse a la atmósfera por un cambio de cobertura. Se fundamenta en un supuesto riesgo que se tiene de eliminación de los bosques y por ende de emisión de carbono. El valor estimado considerando el carbono real y una tasa de deforestación (21).
- 3.1.1.9 **Plantación:** Áreas forestales que carecen de las características principales y los elementos clave de los ecosistemas naturales, como resultado de la plantación de árboles o de los tratamientos silviculturales (21).

3.1.2 EFECTO DE INVERNADERO Y CAMBIO CLIMÁTICO

La Tierra está cubierta por una capa de gases que le dan ciertas características específicas para que la vida en ella sea posible, además la protegen de ciertas radiaciones y agentes externos. Estos gases permiten el paso de la energía solar, la cual calienta la superficie terrestre. Algunos de los gases atmosféricos tienen la función de impedir que el calor escape hacia el espacio exterior, son los llamados gases de efecto invernadero (GEI) y este proceso es lo que se conoce como el "Efecto invernadero" (13).

Si la Tierra no estuviera rodeada por la atmósfera, se mantendría demasiado helada para que la vida se desarrollara en todas las formas que hoy se conocen, el efecto invernadero es un proceso natural que mantiene la Tierra a una temperatura ideal para que la vida exista tal y como se conoce. Con el pasar de los años, el cúmulo de actividades que el ser humano realiza han logrado alterar este proceso natural, provocando que en la atmósfera se acumulen grandes cantidades de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono CO_2 , metano y óxido nitroso), lo cual provoca un sobrecalentamiento de la Tierra, proceso conocido como cambio climático (13 y 29). El calentamiento del planeta es el principal efecto que ha producido el aumento de la temperatura global, en el transcurso de este siglo, de 0.3°C a 0.6°C (Banco Mundial, 1992), el aumento de la concentración de CO_2 desde 285 ppm¹ en la época preindustrial² hasta 350 ppm actuales, incrementándose a razón de aproximadamente 1.5 ppm por año (9). Las temperaturas más altas afectan la precipitación pluvial, provocan el descongelamiento de los polos, alteran

¹ Ppm: partes por millón.

² La época preindustrial se refiere a los siglos que preceden a 1750.

los ciclos de las cosechas, aumentan el radio de acción de las plagas, las cuales contribuyen a la propagación de enfermedades tropicales (13 y 29).

Las actividades humanas que más contribuyen a la producción de los GEI son el uso de combustibles derivados del petróleo, gas y carbón, la tala y quema de los bosques tropicales (13).

3.1.3 PROTOCOLO DE KYOTO

La Convención Marco para el Cambio Climático está conformada por una serie de protocolos que coordinan las negociaciones internacionales, dentro de estos protocolos el más importante es el Protocolo de Kyoto, firmado a finales de 1997. El Protocolo de Kyoto incluye límites legales para las emisiones de GEI de los países industrializados, compromete a estos países a reducir sus emisiones de GEI y para ello, establece tres mecanismos para facilitar el logro de los objetivos de la CMCC, estos mecanismos en conjunto se denominan "mecanismos flexibles" y son (13):

- 1) Implementación Conjunta (IC), que es el desarrollo de proyectos que tienden a reducir o fijar emisiones de GEI entre entidades pertenecientes a países del Anexo I (Países desarrollados o en economías de transición) de la Convención.
- 2) Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), son proyectos de reducción o desplazamiento de emisiones de GEI entre una entidad perteneciente a un país del Anexo I y otra entidad perteneciente a un país no Anexo I. Es en este aspecto donde le corresponde a países como Guatemala participar, dentro de este proceso.
- 3) Intercambio de Comercialización QUELRO's (Obligaciones de Reducción y Limitación de Emisión Cuantificadas), el cual permite a un país del Anexo I comerciar el excedente de reducción de emisiones a que está sujeto de acuerdo al Protocolo de Kyoto, a otro país del mismo anexo que necesite de esa reducción para cumplir con sus compromisos (28).

Es un tratado internacional que compromete a los países industrializados, a reducir las emisiones de gases que provocan el efecto de invernadero para la próxima década. Los países en desarrollo no están comprometidos a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero. Estos países en vías de desarrollo pueden participar voluntariamente y pueden comercializar los excesos de reducción de emisiones de CO₂ que tengan (32).

3.1.4 BIOMASA

En términos muy simples, la biomasa es la energía solar convertida por los vegetales en materia orgánica. Sin embargo, esta biomasa es transformada posteriormente en los distintos niveles de la cadena alimenticia. Por tanto, se

puede diferenciar en biomasa vegetal cuando esta se produce directamente como consecuencia de la fotosíntesis, y en biomasa animal cuando es producida por los seres heterótrofos (20).

Según la definición anterior, habría que medir la totalidad de componentes de un bosque, incluyendo material muerto como desechos y madera de árboles caídos. Por razones prácticas para el estudio que se pretende realizar, el concepto de biomasa se ha limitado a los siguientes componentes: el total de materia orgánica de los árboles arriba del suelo incluyendo hojas, ramillas, ramas, fuste principal y corteza. La biomasa de estos componentes generalmente contribuye con la mayor fracción de la biomasa viviente total en un bosque, y no presenta mayores dificultades en su estimación. Entonces, la biomasa es definida como el total de materia orgánica arriba del suelo que está en los árboles, expresada en toneladas secas por unidad de área (árbol, hectárea, región o país). Es referida como densidad de biomasa cuando es expresada como masa por unidad de área, ejemplo toneladas por hectárea. La biomasa total para una región o país, se obtiene como producto de la densidad de biomasa y el área correspondiente a bosques (5).

3.1.5 BIOMASA Y LA FIJACIÓN DE CARBONO POR LAS PLANTAS

Como se indicó anteriormente, la materia viva o biomasa se forma a través del proceso de fotosíntesis. En la fotosíntesis se producen moléculas de alto contenido energético cuyo coste de almacenamiento es nulo, y en principio, sin pérdidas. Las plantas toman prestadas del medio ambiente natural la energía (fotones de luz) y las materias primas consumidas en la fotosíntesis (carbono, hidrógeno, nitrógeno, potasio, fósforo y otros micronutrientes) (19).

La fotosíntesis es conocida como producción primaria debido a que es la piedra angular de la vida y el punto inicial para el estudio del metabolismo de comunidades. De esta producción primaria en los ecosistemas, pueden derivarse dos términos:

- a) **Producción primaria bruta:** que se refiere a la energía fijada en la fotosíntesis (como biomasa).
- b) **Producción primaria neta:** que es igual a la producción primaria bruta menos la energía perdida en la respiración. (19)

Una planta aprovecha los productos de la fotosíntesis (fotosintatos) en un orden jerárquico, según la prioridad de sus necesidades, así el orden de utilización de la energía es el siguiente (14):

- 1° - Para respiración
- 2° - Para meristemos apicales y raíces
- 3° - Para crecimiento secundario
- 4° - En tejidos de reproducción (flor, fruto, estróbilos)
- 5° - En fuste y ramas principales
- 6° - En mecanismos de defensa

Como puede notarse, si la planta llena una necesidad básica como lo es la respiración tendrá energía para continuar con las siguientes necesidades hasta llegar a la no menos importante que es el desarrollo de mecanismos de defensa. Así, en estados iniciales y medios de desarrollo, los árboles fijan una mayor cantidad de carbono, ya que están produciendo biomasa; pero conforme van llegando a estados adultos, la fijación de carbono llega a estabilizarse y hasta a disminuir (14).

La fijación de carbono tiene una mayor relación con el crecimiento que con otras variables del bosque, aunque indirectamente tendrá relación con aquellas que influyan en la acumulación de biomasa, como podrían ser la densidad, la cobertura de copas y el área foliar, entre otros. En términos generales, rodales con una densidad normal, donde se tiene una adecuada ocupación del sitio, la fijación de carbono tiene una relación directa con el crecimiento de los árboles, tanto a nivel individual como a nivel de rodal, en virtud de que este crecimiento no es más que acumulación de biomasa y esta tiene como componentes principales moléculas que contienen carbono (la celulosa, principalmente). Así, en los rodales con densidad adecuada y que se encuentran en crecimiento, es mayor la acumulación de biomasa que rodales maduros, por ejemplo (19 y 20).

3.1.6 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS ESPECIES A ESTUDIAR

3.1.6.1 *Pinus oocarpa* Schiede

- | | |
|-------------------------|--|
| A. Sinónimos | <i>Pinus oocarpoides</i> Lindl., <i>Pinus oocarpa</i> subesp. <i>microphylla</i> Shaw., <i>Pinus oocarpa</i> subesp. <i>trifoliata</i> Mart., <i>Pinus oocarpa</i> subesp. <i>hchoterenai</i> |
| B. Nombres comunes | Pino prieto, ocote macho (México); pino colorado, pino ocote, pino (América Central). |
| C. Descripción botánica | Árbol normalmente de 36 m de altura, pudiendo alcanzar hasta 48 m, diámetros entre 50 y 90 cm, fuste recto y cilíndrico, copa cónica pero irregular, corteza fisurada de 5 a 10 cm de grosor, se descortiza en bandas irregulares, escamosas y de color rojizo oscuro a grisáceo. El follaje color verde oscuro, acículas erguidas, gruesas y ásperas con los bordes finamente aserrados, unidas en grupos de cinco. Estróbilos masculinos son estaminados, de 1 a 3 cm de largo, por 1 cm de ancho, los estróbilos femeninos son de mayor tamaño, forma ovoide, se abren formando una roseta, del color café mate, planos en la base, maduran de enero a marzo, contienen semillas aladas (8, 25 y 27). |
| D. La madera | La albura es de color amarillo cremoso y el duramen café pálido, su textura es fina, brillo mediano a alto, vetado pronunciado y anillos de crecimiento visibles. El peso específico de la madera varía 0.51 a 0.55 g/cm ³ , moderadamente pesada. Es fácil de preservar, secar y trabajar, moderadamente resistente a la pudrición blanca y |

- café, resistente al ataque de termitas.
- E. Distribución y hábitat Se distribuye naturalmente desde el noroeste de México hasta Nicaragua; se encuentra en las zonas de vida bosque húmedo subtropical (templado) y bosque muy húmedo subtropical (frio); en elevaciones de 800 a 2,500 msnm, con precipitación de 850 a 2,000 mm. Las texturas de suelos mejores para la especie son arenoso, franco arenoso y franco arcilloso, con una profundidad de 15 cm y pH entre 5 y 8. En Guatemala se encuentra en Huehuetenango, Quiché, Chimaltenango, Guatemala, Baja Verapaz, El Progreso, Zacapa, Jalapa, Chiquimula, Santa Rosa y Jutiapa.
- F. Problemas fitosanitarios La semilla es atacada por hongos como *Trichothecium roseum* (50%), *Aspergillus flavus* (15%), *Penicillium sp.* (3%), *Pestalotiopsis sp.* (10%), *Phomopsis sp.* (6%). Los frutos son afectados por *Cronartium conigenum*, que puede causar pérdidas en la cosecha de semillas. En vivero son comunes los hongos que producen el mal del talluelo (damping-off).
- G. Usos (Productos) Madera para aserrio, postes, pulpa para papel, durmientes, resina de buena calidad (8, 18 y 27).

3.1.6.2 *Pinus maximinoi* H.E. Moore

- A. Sinónimos *Pinus tenuifolia* (Benth).
- B. Nombres comunes Pino, pino canis (Méx.), pino candelillo (Guate.), pinabete (Honduras).
- C. Descripción botánica Árbol de 20 a 35 m de altura, ocasionalmente hasta 40 ó 50 m. y diámetros entre 45 y 100 cm. Su copa es densa, ramas con ángulo recto y verticiladas horizontalmente. La corteza joven es delgada y lisa cuando vieja se quiebra en plaquetas elongadas con fisuras color café rojizas. Follaje denso, verde azulado mate o verde grisáceo, poseen canales resiníferos medios, generalmente 5 acículas por fascículo, colgantes y delgadas, de 20 – 28 cm de largo y 0.8 a 0.8 mm de ancho, márgenes finamente aserrados. Las vainas son persistentes. Los estróbilos masculinos son estaminados, los femeninos subterminales, oblongos, aislados o en grupos de 4 a 5, con pedúnculos largos y con escamas delgadas (7, 25 y 27).
- D. La madera Color castaño pálido, textura fina, grano recto, superficie medianamente lustrosa, olor agradable. Su peso específico es de 0.44 a 0.50 g/cm³, ligeramente liviana. Es fácil de tratar con preservantes, moderadamente fácil de trabajar y con buena velocidad de

- secado, no presenta defectos.
- E. Distribución y hábitat Se distribuye naturalmente desde el sureste de México, centro de Guatemala y Honduras, norte de El Salvador hasta el noroeste de Nicaragua; se encuentra en altitudes de 600 a 2,400 msnm, con precipitaciones de 1,000 a 2,400 mm y temperaturas entre 18 a 21 °C. En cuanto a suelos se adapta a suelos franco arenosos y franco arcillosos, con pH entre 4.5 y 8.5, profundidad de 15 cm. En Guatemala se encuentra en los departamentos: El Quiché, Alta Verapaz, Baja Verapaz, El Progreso, Zacapa, Chiquimula, Jalapa, Guatemala, Sacatepéquez, Sololá y Santa Rosa (7, 16 y 27).
- F. Problemas fitosanitarios Los frutos en el árbol son susceptibles al ataque de insectos *Doryctria* y *Cecidomyiidae*. En semilla se han reportado hongos como *Curvularia*, *Fusarium roseum*, *Trichoderma* y *Phomosis*. En vivero son comunes los hongos que causan damping off.
- G. Usos (Productos) Madera para aserrio, construcción y pulpa para papel (7, 16 y 27).

3.1.6.3 *Pinus caribaea* (Morelet.) var *hondurensis*

- A. Sinónimos *Pinus hondurensis* (Look), *Pinus bajamensis* (Griseb.)
- B. Nombres comunes Pitch pine, white pine, yellow pine (Belice), pino de la costa (Honduras), ocote blanco, pino caribe, pino del Petén (Guatemala), pino caribe (Costa Rica), pino caribeño de Honduras (América Latina), caribbean pine (países de habla inglesa).
- C. Descripción botánica Árbol de hasta 45 m de altura y 100 cm de diámetro, copa cónica irregular. La corteza es de color gris-blanquecino hasta gris moreno o moreno rojizo, surcada y partida en placas no profundas, escamosas, o en largas grietas. Las ramas son de color verdusco y ascendentes en los ejemplares jóvenes, más tarde de color rojizo, horizontales, son finas o muy finas, algo encorvadas y escamosas. El fuste presenta poda natural. Las hojas, generalmente tres acículas por fascículo, raramente de 2 y 4 de sección triangular a media luna, de color verde amarillento hasta el oscuro de 6.5 – 33.5 cm de longitud por 0.9 a 1.8 mm de diámetro, con 2 a 4 canales resiníferos. Vainas perennes, anillado-escamosas de 1.0 a 1.6 cm de longitud por 1.8 a 2 mm de espesor; de color café claro grisáceo. Los órganos reproductivos masculinos son amentos cilíndricos de 25 a 45 mm de largo. Los estróbilos femeninos son marrón, con pedúnculos cortos y en grupos de 2 a 4 (6, 17 y 25).

- D. La madera Coloración clara, con tonalidades de amarillo a amarillo – naranja en la albura y de oscura a marrón rojizo en el duramen, es de textura fina, brillo de mediano a alto, veteado medio. Peso específico de 0.44 g/cm³, moderadamente liviana.
- E. Distribución y hábitat Se encuentra en forma natural en rodales discontinuos y fragmentos desde Belice hasta Bluefields, en Nicaragua; en Centroamérica se encuentra en la vertiente Atlántica desde el nivel del mar hasta elevaciones máximas de 850 msnm, con precipitaciones 950 a 3,500 mm y una estación seca de 2 ó 3 meses, temperaturas de 24 a 27.2 °C. Crece en suelos poco fértiles, ácidos (pH de 4 a 6.5), texturas franco arenosas y franco arcillosas. No crece en forma natural en suelos con drenaje defectuoso como en sitios bajos y planos con depresión o con una capa dura e impermeable (6 y 25).
- F. Problemas fitosanitarios Las semillas se ven afectadas por hongos como *Mucor* (50%), *Curvularia* (20%), *Botryodiplodia* (13%), *Trichoderma* (13%) y *Fusarium roseum* (7%). En los viveros tiene problemas con Damping off.
- G. Usos (Productos) Madera para aserrio, construcción, postes y pulpa para papel (6, 17 y 25).

3.2 MARCO REFERENCIAL

3.2.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SITIOS DE MUESTREO

3.2.1.1 *Pinus maximinoi* H.E. Moore

Como se puede observar en el Cuadro 1, *P. maximinoi* fue muestreado en tres fincas distintas, en las tres se encontraba en condiciones de bosque natural. En la fincas Nacional San Jerónimo y El Naranjo, Baja Verapaz, la densidad del bosque era alta, aunque ha sido manejado y por lo tanto, se observa un buen crecimiento de los árboles. Se encontraron árboles de todas los diámetros y alturas, en la Finca Nacional San Jerónimo, la regeneración es puramente natural, mientras que en El Naranjo se estaba aplicando tala rasa, para luego reforestar. En el caso de la finca Sin Nombre de la Aldea La Ciénega, San Raymundo, Guatemala, la densidad de los rodales donde se tomaron datos y muestras era de media a baja, debido a que el bosque ya había sido raleado anteriormente y se estaba aplicando tala rasa, por lo que fue difícil hallar árboles de diámetros mayores.

3.2.1.2 *Pinus oocarpa* Schiede

Las muestras de *P. oocarpa* fueron tomadas en una sola finca, Agua Blanca, ubicada en Potrero Carrillo, Jalapa. La finca tiene una superficie total de 404.70 hectáreas, de las cuales alrededor del 60% es bosque productivo de *P. oocarpa* y *Quercus* spp. Por tratarse de una finca grande y bajo manejo forestal, se encontró una buena cantidad de árboles de cada clase diamétrica, aprovechando la realización de actividades de raleo y saneamiento se realizó el muestreo de los veinte árboles. En la finca se realiza reforestación para áreas ya manejadas, aunque también se maneja regeneración natural, sobre todo en rodales que están bajo manejo. En el Cuadro 1 se presenta un resumen de las principales características de esta finca.

3.2.1.3 *Pinus caribaea* Morelet. var *hondurensis*

P. caribaea fue muestreado en tres fincas distintas, aunque con características muy parecidas, pues se ubican en Poptún, Petén, y áreas cercanas. En los rodales muestreados la densidad había sido afectada por actividades de saneamiento debidas al gorgojo del pino (*Dendroctonus* spp), en algunos casos se estaba aplicando tala rasa debido a que el ataque del gorgojo era ya avanzado. En el Cuadro 1 pueden observarse las principales características de las fincas en que se tomaron las muestras de *P. caribaea*.

Cuadro 1. Características de los sitios de muestreo.

Especie	Finca	Localización	Ubicación geográfica	Altitud* (msnm)	Precipitación* (mm/año)	Temperatura* (°C)	Zona de vida Holdridge	Pendiente* (%)	Topografía	Fisiografía
<i>Pinus maximinoi</i>	Finca Nacional San Jerónimo	San Jerónimo, Baja Verapaz	Lat 15°00'22" N Lon 90°14'28" O	1,650	909	21	bmh-S(f)	35 - 40	Quebrado	Tierras Altas Cristalinas
	El Naranjo	Chilascó, Baja Verapaz	Lat 15°07'20" N Lon 90°10'40" O	1,500	2,045 - 2,514	16 - 23	bmh-S(f)	30 - 40	Ondulado - quebrado	Tierras Altas Cristalinas
	Sin nombre	Aldea La Ciénega, San Raymundo, Guatemala	Lat 14°44'30" N Lon 90°35'40" O	1,500	1,100 - 1,350	20 - 26	bh-MB	10 - 50%	Ondulado - quebrado	Tierras Altas Cristalinas
<i>Pinus oocarpa</i>	Agua Blanca	Potrero Carrillo, Jalapa	Lat 14°44'40" N Lon 89°56'53" O	1,323	1,002	16.5	bh-S(t)	20 - 35	Ondulado	Tierras Altas Volcánicas
<i>Pinus caribaea</i>	ICAP	Poptún, Petén	Lat 16°22'35" N Lon 89°22'05" O	498 - 500	1,500 - 2,000	25.5	bmh-S (c)	0 - 5	Plano	Cinturón Plegado del Lacandón
	Jordania	Poptún, Petén	Lat 16°19'05" N Lon 89°22'19" O	500	1,500 - 2,000	24 - 28	bmh-S (c)	0 - 4	Plano	Montañas Mayas
	Ixobel	Poptún, Petén	Lat 16°19'00" N Lon 89°25'25" O	498 - 500	1,500 - 2,000	25.5	bmh-S (c)	0 - 5	Plano	Cinturón Plegado del Lacandón

Fuente: Subregiones correspondientes del INAB y Sistema de Información Forestal del INAB.

* Datos promedio para el área o región donde se ubica la Finca.

3.2.2 ESTUDIOS REALIZADOS RELACIONADOS CON SECUESTRO DE CARBONO EN BOSQUES

A nivel internacional, uno de los trabajos más importantes es el desarrollado por Winrock International Institute for Agricultural Development (22) que consiste en una guía para el monitoreo de secuestro de carbono en proyectos forestales y agroforestales (A Guide to Monitoring Carbon Sequestration in Forestry and Agroforestry Projects). Esta guía describe un método de costos efectivos para el monitoreo y verificación, sobre bases comerciales, de la acumulación de carbono en plantaciones forestales, bosques naturales manejados y sistemas agroforestales. El sistema desarrollado por Winrock International, proporciona resultados confiables utilizando principios y prácticas aceptadas de inventarios forestales, ciencias del suelo y estudios ecológicos (22).

Otro trabajo importante a nivel internacional es el realizado por Sandra Brown (3), quien es una de las principales investigadoras a nivel mundial respecto a fijación de carbono en bosques. El documento se denomina "Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests". Este trabajo presenta ecuaciones para estimar biomasa en bosques basándose en datos de inventarios forestales, se utilizaron datos existentes de volumen por hectárea para transformarlos en densidad de biomasa (toneladas por hectárea, t/ha). En una segunda etapa del trabajo, se generaron propiamente ecuaciones de regresión para estimar biomasa, donde se relaciona la biomasa secada al horno por árbol con el diámetro a altura de pecho (DAP). Además se generaron factores de expansión, que no son más que factores de corrección para datos de inventarios forestales donde no se toman en cuenta componentes del árbol tales como ramas, ramillas, hojas y raíces. Los datos se obtuvieron en bosques tropicales de Asia, África y América. Las ecuaciones de regresión para estimar biomasa presentadas en el trabajo de Sandra Brown (FAO) aparecen en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Ecuaciones de regresión para estimar biomasa en bosques tropicales.

No. de ecuación	Zona de Vida	Ecuación	Rango en DAP (cm)	No. de árbol	Ajuste R ²
1	Seca	$Y = e^{-1.996 + 2.32 \cdot \ln(D)}$	5 - 40	28	0.89
		$Y = 10^{-0.535 + \log_{10}(AB)}$	3 - 30	191	0.94
2	Húmeda	$Y = 42.69 - 12.800(D) + 1.242(D^2)$	5 - 148	170	0.84
		$Y = e^{-2.134 + 2.530 \cdot \ln(D)}$			0.97
3	Lluviosa	$Y = 21.297 - 6.953(D) + 0.740(D^2)$	4 - 112	169	0.94

Y = biomasa por árbol en Kg, D = DAP en cm, y AB = área basal en cm². Fuente: Brown (3)

Cubero Moya y Rojas Piedra (11) realizaron un estudio de fijación de carbono en melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L.f.) y pochote (*Bombacopsis quinata* Jacq.) en Costa Rica. La cantidad de carbono almacenado en fustes en las plantaciones al momento de la evaluación para *Gmelina arborea* en el sitio A, a los 4:

años es de 11.95 tmC/ha y en el sitio B 3.30 tmC/ha; en biomasa aérea el sitio almacena 13.14 tmC/ha y el sitio B 3.63 tmC/ha. En el caso de *Tectona grandis*, la cantidad de carbono almacenado en fustes en las plantaciones a los 5 años, en el sitio A fue de 16.47 tmC/ha y en el sitio B 7.17 tmC/ha; en biomasa aérea el sitio A almacena 18.11 tmC/ha y el sitio B 7.88 tmC/ha. La cantidad de carbono almacenado en fustes en las plantaciones para *Bombacopsis quinata* a la edad de 5 años en el sitio A fue de 11.95 tmC/ha, en biomasa aérea el sitio A almacena 13.15 tmC/ha; esta especie se evaluó solamente en un sitio. En las conclusiones de su trabajo exponen que la fracción de carbono reportada varió dependiendo del sitio, edad y porción del árbol evaluada, presentándose una mayor fracción en sitios A (buenos), en edades mayores y en el fuste. Además, también concluyeron que para las tres especies se incrementan la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Valor Presente Neto por el pago del servicio de fijación de carbono con respecto al ingreso por venta de madera.

En agosto de 1989 Costa Rica realizó una investigación llamada "Desarrollo de una Técnica no-Destructiva para Estimar Biomasa en el Bosque Muy Húmedo Tropical"; fue realizada por el M.Sc. Edgar Ortiz Malavasi. En tal investigación se generaron ecuaciones para predecir biomasa total (peso seco al horno en kilogramos) por árbol y sus distintos componentes para cinco especies seleccionadas del bosque muy húmedo Tropical (bmh-T) de la región de Horquetas de Sarapiquí, Costa Rica. Las cinco especies seleccionadas fueron: a) Gavilán (*Pentaclethra macroloba*), Cedro Macho (*Carapa guianensis*), Botarrama (*Vochysia ferruginea*), Fruta dorada (*Virola* spp) y Canfin (*Tetragastris panamensis*) (26).

Los resultados del estudio permiten calcular que una hectárea de bosque muy húmedo Tropical (bmh-T) tienen capacidad para almacenar 93.5 ton de carbono. Asimismo, se estima que una plantación forestal de una especie tropical de rápido crecimiento tiene capacidad para fijar 13.8 toneladas de carbono por año, por lo que, si actualmente las actividades humanas sobre el planeta están liberando en la atmósfera aproximadamente 2.9 billones de toneladas de carbono por año, 211 millones de hectáreas de nuevas plantaciones estarían en capacidad de fijar igual cantidad de carbono durante 20 a 30 años (26).

En Guatemala también se ha empezado a trabajar en el tema de fijación de carbono, algunas organizaciones no gubernamentales han recopilado información al respecto, como en este caso lo es Fundación Solar, que presentó en el presente año un cuaderno de trabajo titulado "Elementos Técnicos para Inventarios de carbono en Uso del Suelo". El documento es una recopilación y ampliación de los métodos desarrollados por Winrock para la cuantificación de carbono en sistemas de uso del suelo, el cual presenta a manera general el problema del efecto invernadero y cambio climático, los convenios que se han realizado al respecto y además, lo central es la presentación de las metodologías para cuantificar biomasa por encima y por debajo del suelo, hojarasca y suelo (13).

López (21) hizo una estimación del potencial del carbono y fijación de Dióxido de carbono para los bosques de Guatemala. En su trabajo compara dos escenarios: el primero, la situación sin proyecto o línea base, la cual implica continuar con las mismas condiciones que se habían venido dando hasta 1996, sin efectuar acciones para mejorar el

estado de los recursos forestales del país. El segundo escenario es la situación con proyecto, la que se refiere al establecimiento de acciones que contribuyan al mejoramiento de los recursos forestales, y estimar el aumento de fijación de carbono y absorción de dióxido de carbono por parte de la biomasa forestal del país y cuantificar la reducción de las emisiones en los periodos que considera el trabajo. El trabajo se basó principalmente en datos de inventarios forestales, por lo que se tuvieron dificultades al cuantificar biomasa total, ya que en los inventarios forestales sólo se cuantifica el volumen de madera comercial y no el total.

En el Cuadro 3 se presentan los principales resultados del estudio de López, pudiéndose constatar que de estar implementado el proyecto, las emisiones de carbono se verían reducidas(21).

Cuadro 3. Carbono fijado y carbono liberado en los dos escenarios.

AÑOS	CARBONO FIJADO (Toneladas métricas)		CARBONO LIBERADO (Toneladas métricas)	
	SITUACIÓN SIN PROYECTO	SITUACIÓN CON PROYECTO	SITUACIÓN SIN PROYECTO	SITUACIÓN CON PROYECTO
1996	444.569.309	444.569.309	12.841.911	12.841.911
2000	406.771.587	420.915.182	13.087.907	11.779.116
2005	385.057.417	417.648.745	13.431.619	9.851.765
2015	375.394.099	424.084.513	14.260.478	8.209.037

La Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo con apoyo del Programa Ambiental Regional para Centroamérica (PROARCA) y Central American Protected Area System (CAPAS), realizó un resumen regional de la investigación "Estimación de los Beneficios Ambientales por no Emisión y Fijación de carbono (masa aérea) por Acciones de Ordenamiento Forestal en el Área Propuesta del Corredor Biológico Mesoamericano". El estudio hace estimaciones del potencial de carbono almacenado y captado en el Corredor Biológico Mesoamericano (CBM) en los años 1998 – 2025, bajo tres consideraciones: 1) el carbono almacenado en las áreas propuestas del corredor que se encuentran amenazadas por deforestación, 2) el reclamo de carbono fijado por el crecimiento de la cobertura forestal de superficies bajo bosques secundarios, pastos y/o zonas desnudas de vegetación, 3) por acción directa de la implementación de acciones de ordenamiento forestal en el CBM se puede disminuir o impedir el cambio de uso y la reconversión a usos forestales de tierras con aptitud forestal. Los datos de biomasa se obtuvieron a partir de una revisión de datos de volúmenes forestales a nivel nacional y georeferenciados a zonas de vida; en aquellos casos donde no se encontraron valores, se utilizaron los valores promedio mundiales reportados por el IPCC (1996). Se creó un programa computarizado para correlacionar los datos y derivar los valores de carbono real o almacenado y la emisión evitada (28).

Los resultados que se obtuvieron muestran un estimado de carbono almacenado para el CBM de 1.560.471.934 toneladas al año 1992 y una emisión evitada de 36.413.333 toneladas anuales asumiendo acciones de ordenación forestal para disminuir la deforestación del CBM. El potencial de fijación de carbono se estima en 8.726.732 toneladas anuales por recuperación de zonas de aptitud forestal considerando solamente cuatro países ya que en tres de ellos no fue posible hacer estimaciones por carecer de información sobre extensión y ubicación de las áreas potencialmente sujetas a recuperación de la cobertura forestal. (28)

Morales (23) realizó un estudio para generar una ecuación de biomasa en hule (*Hevea brasiliensis*), trabajó en plantaciones de la Costa Sur de Guatemala. La metodología utilizada en esta investigación fue la propuesta por el Winrock International Institute for Agricultural Development. En su trabajo, Morales utilizó como variable independiente el diámetro a la altura de pecho (DAP) y como variable dependiente la biomasa en Kg. Con los datos tomados en campo y laboratorio, probó tres modelos: uno lineal con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.88; un modelo logarítmico con un R^2 de 0.85 y un modelo cuadrático con R^2 de 0.97. Este último fue el modelo elegido como mejor pues su R^2 demuestra un mejor ajuste para los datos utilizados, el modelo es: $Y = 0.75 x^2$, donde Y es la biomasa total del árbol y X es el diámetro a la altura de pecho. Luego de esto, el carbono fijado se estima por medio de la ecuación $CF = Y \times 0.5$, este último es un índice del contenido de carbono que se considera tiene la biomasa de las plantas.

3.2.3 SITUACIÓN ACTUAL DE LA CONVENCIÓN SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

En agosto de 2001, durante la celebración del "Día Forestal", el Viceministro de Ambiente y Recursos Naturales realizó una presentación sobre "El Potencial de la venta de captura de carbono para el sector forestal, de la cual se extrajo la información presentada a continuación (12).

3.2.3.a LA CONVENCIÓN MARCO SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO

Se abrió a la firma de 154 países en junio de 1992 en Río de Janeiro durante la realización de la Cumbre de la Tierra. Para 1999, 175 Estados se habían adherido y más de 30 lo habían ratificado (incluyendo Guatemala). El objeto de la Convención es estabilizar las emisiones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a aquellos niveles que impidan interferencias peligrosas en el sistema climático.

Las opciones de mitigación deben ser, en general:

- a. Mejoramiento en la sustitución de combustibles de generación eléctrica (cogeneración).
- b. Eficiencia energética en las industrias.

- c. Reducción de las emisiones de la flota de transporte (control de emisiones, educación vial, etc.).
- d. Iluminación Pública más eficiente.
- e. Mejoramiento en la quema de la leña.

En su tercer periodo de sesiones (noviembre 1997), la Conferencia de las Partes (COP), aprobó el Protocolo de Kyoto; las partes en dicho Protocolo que son países desarrollados se comprometen a reducir sus emisiones globales de efecto de invernadero, por lo menos en el 5.2% tomando como base las emisiones de 1990. El periodo de cumplimiento se refiere a los años 2008 -2012.

3.2.3.b REUNIÓN DE BONN (COP6 BIS)

La COP6 recientemente realizada en Bonn, Alemania, finalizó las actividades que quedaban pendientes y se logró que varios países se comprometieran a su ratificación y posterior puesta en funcionamiento, aunque Estados Unidos se ha mostrado renuente a firmar. La Unión Europea y los otros países desarrollados tuvieron una amplia participación en el debate, contribuyendo al compromiso de ratificación. Existen cuatro ejes que deben saberse a partir de la COP 6 Bis (12):

1. Financiamiento

- a. En el Marco de la Convención
- b. Fondos del GEF y bilaterales
- c. Fondos nuevos en el marco de la Convención

2. Medidas de Mitigación

- a. Eliminación de imperfecciones del mercado (exenciones de impuestos en el caso de uso de tecnologías ecológicamente peligrosas).
- b. Cooperación para transferencia de tecnología.
- c. Creación de un grupo de control de cumplimiento.
- d. Sólo los firmantes del Protocolo de Kyoto tendrán derecho a transferir o adquirir créditos generados en virtud de la utilización de mecanismos.

3. Mecanismo de Desarrollo Limpio

- a. Los mecanismos son suplementarios a medidas nacionales.
- b. Facilitación de Información sobre Cumplimiento y progresos verificables.

- c. Las reducciones certificadas de emisiones pueden ser utilizadas por las partes del Anexo I para cumplir sus compromisos.
- d. A partir de la COP8 (2002), habrá modalidades y procedimientos simplificados.

4. Las actividades relativas a la forestación y reforestación deben registrarse por

- a. Actividades basadas en conocimientos científicos.
- b. Metodologías congruentes a lo largo del tiempo.
- c. La mera presencia de carbono almacenado se excluirá de la contabilidad.
- d. La contabilidad no implica transferencia de compromisos a un periodo de compromiso futuro.
- e. Demostrar que las actividades se han hecho a partir de 1990.
- f. Máximo de 8.2 megatoneladas de carbono por parte y año; sin descuentos.
- g. Las actividades admisibles no serán superiores del 1% de las emisiones del año base (1990) de esa parte, multiplicada por 5 (15).

3.2.3.c PRINCIPALES OPCIONES DE MITIGACION DE EMISIONES EN LOS RECURSOS FORESTALES

- a. Protección de Bosques Naturales (Mantenimiento de Reservas de carbono).
- b. Incremento de la Cobertura Arbórea (Aumento de Reservas de carbono).
- c. Eficiencia en el Manejo Forestal y en la Utilización de los productos del bosque (Bioenergía) (15).

3.2.3.d NECESIDADES NACIONALES

- a. Sistema Nacional Fiable de Contabilidad de carbono
- b. Técnicos en los Órganos Subsidiarios de la Convención
- c. Inversión PÚBLICA Y PRIVADA en las Acciones de las siguientes COP's
- d. Fortalecer la Oficina Nacional de MDL/OGIC
- e. Analizar los Lineamientos Básicos para la Mitigación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en los Recursos Forestales, contenido en la Primera comunicación Nacional de Guatemala sobre Cambio Climático.
- f. Desarrollar el Plan de Mitigación (Sector Forestal)(15)

3.2.3.e LA COP7

Hace tan sólo unos días, se realizó la VII Conferencia de las Partes (COP7), en Marrakech, Marruecos. Los informes de dicha Conferencia no están disponibles aún, reportes de prensa informan que después de varias horas de deliberaciones, los países participantes lograron ponerse de acuerdo en cuanto a la manera de poner en práctica el Protocolo de Kyoto. Los 165 países participantes aprobaron la totalidad de las normas. No todos los países han

ratificado con su firma los acuerdos del Protocolo de Kyoto. Estados Unidos rechaza los acuerdos propuestos, decidió retirar su participación a principios del presente año, y elaborar su propio plan de protección ambiental (1).

3.2.4 SITUACIÓN DEL MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO EN GUATEMALA

El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) lo establece el Artículo 12 del Protocolo de Kyoto y trata los proyectos de mitigación del cambio climático llevados a cabo entre los países del Anexo I y los países en desarrollo (no Anexo I). El MDL tiene los siguientes propósitos:

- i. Colaborar para que los países no Anexo I alcancen el desarrollo sostenible.
- ii. Contribuir al objetivo de la CMCC de estabilizar las concentraciones atmosféricas de GEI, y
- iii. Asistir a los países del Anexo I para alcanzar sus metas de mitigación (12).

3.2.4.a Los aspectos positivos del MDL, son:

- i. Beneficio económico, atracción de inversión extranjera
- ii. Mejoramiento del sector forestal en cuanto a tecnología e industrialización
- iii. Promoción de una mayor cobertura boscosa y conservación de áreas naturales (10)

3.2.4.b Los aspectos negativos:

- i. No existe una política gubernamental, por lo que no hay lineamientos claros a seguir.
- ii. Hay mucha política partidista y corrupción involucrada, que enturbian los procesos
- iii. El proceso es lento y no hay mucho apoyo
- iv. No ha habido negociaciones todavía, porque no hay bases sólidas, entonces no se invierte (10).

3.2.4.c Experiencias en cuanto a presentación de proyectos:

Las experiencias son diversas, la mayoría coinciden en que no existen leyes, no hay apoyo ni un liderazgo claro en cuanto al MDL a nivel de país, entonces los proyectos se quedan en sus primeras fases porque no se puede invertir en algo incierto totalmente.

Hasta ahora el proceso es largo y no existe interés de ninguna organización internacional o empresas que quieran invertir en proyectos de carbono, debido al alto riesgo que tienen los proyectos, la poca garantía que existe en cuanto a la permanencia de los bosques y la longevidad de los productos extraídos de los mismos (10).

3.2.4.d Opiniones/comentarios acerca del MDL:

La opinión general es que hace falta en primer lugar una investigación científica que apoye todo el proceso, hay desconocimiento del comportamiento de los bosques o de las especies en las distintas regiones del país, en lo referente a cuánto carbono fijan, cuál es su adicionalidad.

Además, hacen falta políticas de gobierno y que exista un liderazgo claro, para que los esfuerzos no sean aislados sino que haya un organismo o una oficina donde se canalice toda la información y se unifiquen criterios (10).

3.2.4.e Sobre proyectos de MDL:

Los proyectos que han sido propuestos son pocos y no han pasado de las primeras fases como lo son identificación, perfil o prefactibilidad. Todo esto se debe, según explicaron los entrevistados, a que como no existen políticas ni lineamientos a seguir, además de que no se ha ratificado por completo el Protocolo de Kyoto, entonces no hay mucho interés por parte de países extranjeros en invertir. Es sobre todo difícil el proceso para proyectos de uso del suelo, ya que las garantías son más bajas y se corren muchos riesgos.

Para algunos de los trabajos iniciados se ha obtenido financiamiento de diferentes organismos internacionales, de países como Japón, Noruega, Estados Unidos, Holanda. De Guatemala han invertido la Gremial de Huleros, CONAP, CONAMA y el INAB, en conjunto con ONG's extranjeras.

Aún no se ha ejecutado ningún proyecto, por eso las experiencias fueron expresadas más que todo en lo que respecta a propuesta de proyectos y los estudios que se han realizado, en párrafos anteriores (10).

4. OBJETIVOS

4.1- OBJETIVO GENERAL

- 4.1.1 Generar ecuaciones locales de regresión, que permitan estimar la biomasa del árbol a partir de variables o características de fácil medición y cuantificar el carbono presente en *Pinus oocarpa*, *P. caribaea* y *P. maximinoi*, en algunos bosques naturales de Guatemala.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 4.2.1 Estimar biomasa total en las especies *Pinus oocarpa*, *P. caribaea* y *P. maximinoi* a partir de variables de fácil medición (DAP, altura del árbol en pie).
- 4.2.2 Estimar el Carbono presente en las especies *Pinus oocarpa*, *P. caribaea* y *P. maximinoi*, en función de la biomasa total.

5. METODOLOGÍA

5.1 SELECCIÓN DE ESPECIES y ÁREAS DE ESTUDIO

Las especies que se tomaron en cuenta para el presente estudio son *Pinus oocarpa* Schiede, *Pinus maximinoi* H.E. Moore y *Pinus caribaea* (Morelet.) var *hondurensis*, debido a su importancia económica para el país, ya que son las tres principales especies de coníferas con las que se está trabajando en plantaciones sujetas al Programa de Incentivos Forestales (PINFOR) que el Instituto Nacional de Bosques (INAB) maneja, por ello se considera que son las que mayor demanda tienen actualmente y que más área ocupan comparada con otras especies de coníferas.

Las áreas donde se realizó el estudio fueron elegidas tomando en cuenta la distribución natural de las especies y en las cuales existieran licencias para aprovechamiento forestal, debido a que fue necesario derribar los árboles para su medición. De esta cuenta, a continuación se indican las áreas donde se realizó la fase de campo de la investigación para cada especie. Los nombres y características de las fincas en las que se trabajó, aparecen en el Marco Referencial (ver Cuadro 2).

Para *Pinus maximinoi* el trabajo se llevó a cabo en fincas ubicadas en áreas cercanas a San Jerónimo, Baja Verapaz y en San Raymundo, Guatemala. Los datos y las muestras de *Pinus oocarpa* fueron tomadas en Potrero Carrillo, Jalapa. En el caso de *Pinus caribaea* var *hondurensis*, se trabajó en el área conocida como "Pinares de Petén", en Poptún, Petén.

5.2 SELECCIÓN DE RODALES

Los rodales donde se trabajó fueron seleccionados en base a las especies de interés, por ser áreas naturales se encontraron de todas las edades y clases diamétricas, para muestrear árboles de cada una y tener una muestra representativa de cada especie, ya que se pretendía generar una ecuación de biomasa por especie. Además los rodales debían presentar un manejo similar, crecimiento normal con una densidad adecuada para que la ecuación generada se adapte mejor a masas boscosas con manejo y condiciones generales normales. Debido a que la metodología planteada es destructiva, fue necesario que los rodales tuvieran licencia para aprovechamiento maderero y que éste se estuviera realizando en las fechas en que se pretendía realizar la investigación, como antes se indicó.

5.3 TIPO DE MUESTREO

Para seleccionar una muestra representativa de la población lo recomendable es realizar un muestreo o selección al azar. En este estudio se pretende tener un rango amplio de diámetros para poder generalizar los modelos a todas las clases diamétricas existentes en los bosques que están bajo manejo forestal. En ese caso Girón (14)

recomienda el muestreo selectivo, ya que éste permite elegir los árboles que se necesitan para tener todos los tamaños en cuenta árboles de todas las categorías diamétricas y que tengan las características que se describen en el siguiente inciso.

5.4 UNIDADES DE MUESTREO Y SELECCIÓN DE LOS ÁRBOLES

La unidad de muestreo fue cada árbol. Los árboles a medir se eligieron por clases diamétricas, tomando en cuenta que tuvieran en general buen crecimiento y desarrollo, según su edad, que tuvieran la copa completa y que no estuvieran visiblemente afectados por alguna plaga o enfermedad. Por tratarse de un estudio realizado en bosques naturales, el muestreo que se utilizó fue selectivo, para obtener árboles representativos de cada categoría diamétrica. Se plantearon cinco categorías diamétricas (CD), las cuales se presentan en el Cuadro 4. En bosques naturales existen árboles diámetros mayores a los planteados para este trabajo, pero la existencia de los mismos es escasa, y además, es bastante común aprovechar los árboles de pino en diámetros no muy grandes, por lo que este rango se consideró adecuado para el estudio.

Cuadro 4: Categorías diamétricas a muestrear

CATEGORÍA DIAMÉTRICA	RANGO (cm)
5	5 – 9.99
15	10 – 19.99
25	20 – 29.99
35	30 – 39.99
45	40 \geq 50

5.5 TAMAÑO DE LA MUESTRA

Debido a que el presente trabajo es pionero, para definir el tamaño de la muestra no se ha encontrado mayor referencia en estudios que tienen relación con el tema, así que aunque hubiera sido necesario plantear un premuestreo para determinar el tamaño de muestra, debido a que el estudio es en sí costoso por el tiempo y equipo necesarios en campo y laboratorio, se consideró no realizar el premuestreo.

El tamaño de la muestra se ha definido en 20 árboles por especie, que fueron distribuidos en las cinco clases diamétricas anteriormente indicadas, tomando en cuenta 4 árboles para cada una. El tamaño se considera adecuado

debido a que se trabajó con 3 especies y esto implica 60 árboles en total, los árboles de mayores diámetros (arriba de 25 cm) requieren de un día completo de trabajo y además las muestras de fuste necesitan estar en hornos de secado por poco más de dos semanas, lo cual implicaba gran inversión en recursos.

5.6 VARIABLES

5.6.1 Variables Primarias

Las variables primarias tomadas en cuenta son:

- 5.6.1.1 DAP (Diámetro a la altura de pecho, considerada a 1.30 m del suelo), en cm.
- 5.6.1.2 Altura del árbol en pie (m)
- 5.6.1.3 Altura del tocón (m)
- 5.6.1.4 Diámetro del tocón (cm)
- 5.6.1.5 Diámetro del fuste a cada dos metros, desde el suelo (cm)
- 5.6.1.6 Peso fresco total de hojas, ramas, ramillas (kg)
- 5.6.1.7 Peso fresco de cada muestra de fuste, hojas, ramas y ramillas (g)

5.6.2 Variables Derivadas

- 5.6.2.1 Volumen del fuste principal (m^3)
- 5.6.2.2 Densidad de la madera (g/cm^3)
- 5.6.2.3 Masa del fuste (kg)
- 5.6.2.4 Peso seco de las muestras llevadas a laboratorio
- 5.6.2.5 Peso seco total de fuste, ramas, ramillas, hojas.
- 5.6.2.6 Contenido de carbono por árbol.

5.7 TOMA DE DATOS EN EL CAMPO

El procedimiento utilizado fue el que se describe a continuación:

- 5.7.1 Se seleccionó el árbol de la manera que se indicó en la sección 5.4.
- 5.7.2 Se midió DAP y altura del árbol en pie, utilizando cinta diamétrica e hipsómetro Sunnto, respectivamente.
- 5.7.3 Se derribó el árbol con motosierra, tratando que el lugar de caída se encontrara lo más limpio y despejado posible.
- 5.7.4 Se cortaron todas las ramas del fuste principal, para que las siguientes mediciones se facilitaran.

Medidas del fuste

- 5.7.5 Se obtuvieron las medidas necesarias del árbol derribado: altura y diámetro del tocón (para obtener el volumen del mismo), longitud del árbol, diámetros a cada dos metros, todas las medidas de altura o longitud se tomaron desde el suelo.
- 5.7.6 Se tomaron tres rodajas muestra (Ver Figura 1A): una de la parte cercana al tocón, una de la parte media del árbol y una de la parte alta.
- 5.7.7 Se identificó cada rodaja con un marcador a prueba de agua, se colocó código de especie, el número de árbol y número de rodaja (siempre la uno fue la de la parte baja y la tres la de la parte alta) con los códigos que aparecen en los Cuadros 5 y 6.

Cuadro 5: Códigos para identificar especies

Especie	Código
<i>Pinus maximinoi</i>	PM
<i>Pinus oocarpa</i>	PO
<i>Pinus caribaea</i>	PC

Cuadro 6: Códigos para identificar cada componente del árbol

COMPONENTE	CÓDIGO
Fuste	Fu
Corteza	Cz
Hojas	Ho
Ramas	Ra
Ramillas	Rll

Por ejemplo, para la rodaja de la parte baja (1) del árbol 2 de *P. maximinoi*, su identificación sería:

PM Arb 2 Fu 1

- 5.7.8 Se obtuvo el peso fresco de cada rodaja en el campo, para lo cual se utilizó una balanza colgante, graduada en kilogramos o gramos, según el tamaño y peso de la muestra lo requiriera.
- 5.7.9 Inmediatamente después, se colocó cada rodaja en una bolsa plástica separada, para evitar la pérdida humedad; cada bolsa fue debidamente identificada con papel y cinta adhesiva transparente, para evitar que se perdiera la identificación por la humedad. Se trató que las muestras se mantuvieran lejos de la luz solar.

5.7.10 Se colocaron todas las rodajas de un mismo árbol en una sola bolsa grande (o en varias si es un árbol grande), para evitar la pérdida o confusión de información. En el Anexo 1 puede observarse una gráfica del árbol y las medidas tomadas al mismo.

Ramas, ramillas y hojas

- 5.7.11 De las ramas separadas anteriormente se diferenciaron entre ramas y ramillas dependiendo del diámetro de estas. Las de diámetro mayor a 2 cm son consideradas ramas, las de diámetro menor a 2 cm fueron tomadas como ramillas.
- 5.7.12 Todas las hojas se separaron y se obtuvo el peso fresco total en kilogramos de ramas, ramillas y hojas por separado, para lo cual se utilizó una balanza colgante.
- 5.7.13 Para obtener valores de humedad, se tomaron tres submuestras de cada componente (hojas, ramas y ramillas). Dichas submuestras se colocaron en bolsas plásticas selladas e identificadas de manera similar a las muestras de fuste, con los códigos indicados para cada componente, así por ejemplo la submuestra 3 de hojas del árbol 2 de *P. maximinoi* fue identificada así:

PM Arb 2 Ho 3

- 5.7.14 Todas las submuestras de fuste, ramas, ramillas y hojas, debidamente identificadas, se llevaron al laboratorio a la brevedad posible, para el trabajo que se describe a continuación.
- 5.7.15 El proceso antes descrito se repitió con cada uno de los árboles.

5.8 TRABAJO DE LABORATORIO

5.8.1 Para realizar el trabajo de laboratorio, las muestras se trabajaron en el mismo orden en que fueron cortados los árboles, para reducir el deterioro que puede ocurrir en las muestras si se deja durante mucho tiempo en refrigeración.

Análisis de volumen para las rodajas de fuste

El método utilizado para determinar el volumen de la madera fue el de Heinrichs y Lassen (1970), el cual sugiere lo siguiente (26):

- 5.8.2 Se determinó el diámetro medio de cada rodaja, con y sin corteza. Se midieron seis u ocho diámetros para obtener un promedio aceptable.
- 5.8.3 La corteza se retiró de cada rodaja, con martillo y cincel.

- 5.8.4 Inmediatamente se obtuvo el peso fresco (gramos) de ambos, rodaja de madera y corteza.
- 5.8.5 Se pusieron la madera y corteza en agua por lo menos una hora para llenar las células de la superficie. Esto para prevenir la absorción y adsorción de agua durante la determinación de volumen. Al sacar cada rodaja muestra del agua, se secó el exceso de agua.
- 5.8.6 Se taró una balanza colgante a 0 (cero) gramos con el lazo (rafla) para sostener la pieza de madera, inmerso en agua.
- 5.8.7 Se pesó el trozo de madera en el aire y se registró este peso (p_1). P_1 = peso húmedo de espécimen (pieza de madera).
- 5.8.8 Se procedió a colocar la pieza de madera dentro del recipiente con agua y se volvió a pesar. Este fue el p_2 . p_2 = peso inmerso.
- 5.8.9 Se restó el p_2 del p_1 para obtener el volumen de la pieza de madera en centímetros cúbicos. $V = p_1 - p_2$. Este procedimiento se consideró por si el espécimen tendía a hundirse o a flotar.
- 5.8.10 El volumen obtenido se relacionó con el peso fresco para obtener la densidad de la madera en gramos por centímetro cúbico, la cual se relaciona con el volumen total del fuste para obtener el peso total del mismo.
- 5.8.11 Las submuestras fueron secadas en horno a una temperatura aproximada entre 95 a 105 °C hasta que se estabilizó la pérdida de peso. El tiempo de secado dependió del ancho y la densidad de la muestra. El mínimo de tiempo de secado son 48 horas, hasta un máximo de dos semanas para rodajas de mayores diámetros.
- 5.8.12 Se registraron los pesos a diario. Cuando el peso se estabilizó, se anotó el peso seco.
- 5.8.13 En el caso de las muestras de ramas, ramillas y hojas, se obtuvo el peso fresco, se colocaron en bolsas de papel que fueron pesadas individualmente, se pusieron al horno para secado a una temperatura entre 80 a 90 °C. Se registraron los pesos a diario hasta obtener peso seco.

5.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

- 5.9.1 Densidad específica de madera o corteza, rodaja:
 $D.e. = \text{peso secado al horno (g)} / \text{volumen fresco (cc)}$
- 5.9.2 Peso fresco inicial (PV en gr/cm^3):
 $PV = \text{peso fresco (gr)} / \text{volumen fresco (cm}^3\text{)}$

5.9.3 Contenido de humedad, en base a peso seco, muestra:

$$CH^{\circ}S = (\text{peso fresco} - \text{peso seco}) / \text{peso seco}$$

5.9.4 Contenido de humedad, en base a peso fresco, muestra:

$$CH^{\circ}F = (\text{peso fresco} - \text{peso seco}) / \text{peso fresco}$$

5.9.5 Volumen de la troza de madera (m^3):

$$VT_i = \frac{\pi}{4} \frac{(\text{Diámetro mayor})^2 + (\text{Diámetro menor})^2}{2} \times \text{largo de la troza}$$

5.9.6 Cubicación del fuste:

$$VF = \sum_{i=1}^n VT_i$$

Donde: VF = Volumen total del fuste

VT_i = Volumen de las trozas de madera

5.9.7 D.e. promedio del fuste:

$$D.e.m. = \frac{VT_1 \bullet D.e_1 + VT_2 \bullet D.e_2}{VF}$$

Donde:

$$D.e_1 = \frac{D.e.L + D.e.M}{2} \quad \text{y} \quad D.e_2 = \frac{D.e.M + D.e.T}{2}$$

D.e.L = Densidad específica obtenida de la base del fuste

D.e.M = Densidad específica obtenida de la sección media del fuste

D.e.T = Densidad específica obtenida de la sección alta del fuste

5.9.8 Peso seco total (en kg.) del fuste

$$PTF = D.e.m. \bullet VF \bullet 1000$$

5.9.9 Peso fresco del fuste (en kg.):

$$PFF = VF \times PVM \times 1000$$

Donde: VF = Volumen del fuste

PVM = Peso fresco inicial medio del fuste

5.9.10 Peso seco de follaje (kg):

$$PSF = PFTF \times (1 - CH^*F)$$

Donde: PFTF = peso fresco total del follaje.

5.9.11 Peso seco de ramas y ramillas de manera similar al inciso anterior.

5.9.12 Los resultados obtenidos de los cálculos anteriores se ordenaron y tabularon para obtener la biomasa total de cada árbol por encima del suelo, mediante la sumatoria de los pesos secos de cada uno de sus componentes (ramas, ramillas y hojas). En el caso de los fustes (incluido el tocón), la biomasa se calculó a partir de densidad calculada en laboratorio y con volumen tomado en campo.

5.9.13 El valor de biomasa en kilogramos se dividió dentro de 1,000 para obtener toneladas. Las toneladas se multiplicaron por 0.5 para obtener el contenido de carbono, la razón por la que se multiplica por 0.5 para obtener carbono se debe a que la literatura indica que en promedio la materia vegetal contiene un 50% de carbono, una vez se ha removido el agua (Mac Dicken, 1997). El valor de carbono es dividido dentro de la superficie de la parcela de muestreo (en m²) para obtener tC/m². Al multiplicarlo por 10,000 m²/ha se obtienen tC/ha (13).

5.10 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

5.10.1 **Regresión lineal múltiple:** Se utilizó la técnica de regresión para estimar varios modelos lineales y no lineales, con el fin de predecir la biomasa total a partir de las variables predictoras o independientes: DAP y Altura en pie.

Los modelos fueron estimados utilizando el software de análisis estadístico STATISTICA® (30). Aunque se probó también el software Statistical Analysis System, SAS®, las pruebas realizadas daban resultados muy parecidos a los obtenidos con STATISTICA. Este último, es un programa mucho más fácil para trabajar, en SAS es necesario escribir el programa de ingreso para el análisis, lo cual implica mayor conocimiento de los procedimientos, sintaxis de los procesos, etc. Al utilizar STATISTICA, solamente se introducen los datos y el programa va dando las opciones para análisis, facilitando el procedimiento.

Para predecir cuál era el "mejor" modelo, se utilizó el estadístico coeficiente de determinación (R^2), cuyo rango oscila entre 0 y 1 (cero y uno). Este coeficiente, expresa el porcentaje de la variación total presente en la variable biomasa total por encima del suelo, que es atribuible al modelo de regresión en cuestión. Por lo tanto, un investigador seleccionará un modelo cuyo R^2 esté lo más cercano a la unidad o al 100%.

El análisis de regresión es uno de los métodos estadísticos más ampliamente usados. Es muy útil en situaciones experimentales donde el investigador puede controlar las variables independientes. Un experimentador típicamente desea investigar varias variables independientes simultáneamente, porque casi siempre más de una variable independiente tiene influencia en la respuesta. (24)

5.10.2 Procedimiento lógico de análisis (STATISTICA®):

- 5.10.2. a STATISTICA es un sistema comprensible, que integra análisis de datos, gráficas, manejo de base de datos y todo un sistema de aplicaciones comunes desarrolladas a partir de la presentación de una amplia selección de procedimientos básicos y aspectos analíticos avanzados para exploración de datos y científicos (30).
- 5.10.2. b **Regresión Múltiple:** El propósito general de la regresión múltiple es analizar la relación entre varias variables independientes o predictoras y una variable o criterio dependiente. Este módulo trabaja con regresión lineal múltiple de mínimos cuadrados y calcula en forma detallada estadísticas para residuales. STATISTICA calcula todos los resultados estándares de las estadísticas de regresión múltiple, y ejecuta extensivos análisis de residuos (30).
- 5.10.2. c **Modelos Lineales y no lineales generalizados:** Este módulo provee una generalización del modelo de regresión lineal tal como 1) efectos no lineales, así como lineales, que pueden probarse 2) para variables predictoras categóricas, como también para variables predictoras continuas, usando 3) cualquier variable dependiente cuya distribución siga alguna representativa de la familia exponencial de distribuciones, así como para cualquier variable dependiente distribuida normalmente (30).
- 5.10.2. d **Estimación no lineal:** La estimación no lineal involucra encontrar la mejor relación de ajuste entre valores de la variable dependiente y los valores de la gama de una o más variables independientes (se usa tanto en prueba de hipótesis como en métodos exploratorios). Se puede especificar cualquier tipo de modelo al escribir en la respectiva ecuación dentro de la edición de la ecuación (en el programa). Las ecuaciones pueden incluir operaciones lógicas; además, modelos de regresión discontinuas y también se pueden estimar modelos que incluyen variables indicadoras. Las ecuaciones también pueden incluir una amplia selección de funciones de distribución y funciones acumulativas de distribución (30).

Los modelos se ajustan usando mínimos cuadrados o estimación de máxima verosimilitud, o cualquier función que el usuario especifique. Cuando se usan los criterios de mínimos cuadrados, los algoritmos de Levenberg-Marquardt y Gauss-Newton, pueden usarse para estimar los

parámetros para problemas de regresión lineal y no lineal. Se tiene control total de todos los aspectos de los procedimientos de estimación (por ejemplo, valores de inicio, intervalo entre valores, criterios de convergencia, etc.). Los modelos de regresión no lineal mas comunes están predefinidos en el módulo de **Estimación no lineal**, y se pueden escoger con solo usar los comandos del menú. Dichos modelos de regresión incluyen el modelo de regresión exponencial. Los resultados estándares no lineales incluyen los parámetros estimados y su error estándar, la matriz de varianza/covarianza de los parámetros estimados, los valores predichos, residuos y la medida apropiada de "Bondad de ajuste" (30).

- 5.10.2. e **Mínimos cuadrados:** La estimación de mínimos cuadrados se orienta a minimizar la suma de la desviación estándar de los valores observados para la variable dependiente de lo predicho por el modelo (30).
- 5.10.2. f **Máxima verosimilitud:** Una alternativa para la función de pérdida de mínimos cuadrados, es maximizar la función de verosimilitud o verosimilitud logarítmica (también reducir la función de verosimilitud logarítmica negativa: el término máxima verosimilitud fue usado por primera vez por Fisher, 1922) en términos generales, la función de verosimilitud se define como:

$$L = L(Y, Modelo) = \prod_{i=1}^n \{p[y_i, parametros(x_i)]\}$$

En teoría, se puede calcular la probabilidad (L, la verosimilitud) de los valores específicos de la variable dependiente que intervienen en la muestra, dado el modelo de regresión respectivo. Asumiendo que todas las observaciones son independientes entre ellas, esta verosimilitud es la suma geométrica (Π , a través de $i = 1$ a los n casos) de probabilidades para cada observación individual (i) de que ocurra, dado el modelo respectivo y parámetros para los valores de "x". (la suma geométrica significa que se multiplicarán las probabilidades individuales a través de los casos). También es común expresar esta función como un logaritmo natural, en tal caso, la suma geométrica se convierte en una suma aritmética regular (Σ , a través de $i = 1$ para n casos) (30).

Dado el modelo respectivo, a mayor verosimilitud del modelo, mayor es la probabilidad de ocurrencia en la muestra de los valores de la variable dependiente. Por lo tanto, a mayor verosimilitud, mayor es el ajuste del modelo para la base de datos (30).

Regresión no lineal ajustada: Se utiliza para especificar transformaciones no lineales de las variables. Estas variables transformadas se usan en el análisis de regresión. Las transformaciones disponibles son: X a la segunda, tercera, cuarta o quinta potencia, la raíz cuadrada de X, logaritmo natural de X, logaritmo base 10 de X, logaritmo natural a la potencia de X (e^x), 10 a la potencia de X, y el inverso de X. (30).

5.10.3 **Factor de expansión de biomasa:** Este dato se obtuvo a partir de datos de biomasa secada al horno. Se hizo una relación matemática entre la biomasa total y la biomasa del fuste:

$$\text{FEB} = \text{Biomasa total / Biomasa del fuste}$$

Donde,

$$\text{FEB} = \text{Factor de expansión de biomasa}$$

El objeto de calcular el factor de expansión es que funcionará como un factor de corrección para datos de inventarios forestales; debido a que en éstos solamente se toma en cuenta el volumen comercial del árbol y se desprecia la biomasa acumulada en hojas, ramas y ramillas (3).

6. RESULTADOS

6.1 MODELOS PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA

Luego de ingresar al paquete STATISTICA los datos obtenidos para las variables, se probaron varios modelos lineales que mostrasen las relaciones entre las variables biomasa (variable dependiente), DAP y Altura del árbol en pie, estas dos últimas como variables independientes. Esto se decidió basándose en el trabajo realizado en hule (23), donde el modelo obtenido fue lineal. Los modelos lineales probados no presentaron coeficientes de determinación mayores al 60%. Por ello, se probaron modelos de crecimiento exponencial, y debido a que se estudian variables de crecimiento en especies arbóreas, la ecuación de regresión que mejor se adaptó a los datos obtenidos fue una de crecimiento exponencial, en el caso de las tres especies en estudio. A continuación, se presentan los modelos para estimar biomasa de cada una de las especies estudiadas, así como su respectivo coeficiente de determinación (Cuadro 7).

Cuadro 7. Modelos de regresión para estimar biomasa generados por este estudio.

ESPECIE	MODELO	R ²
<i>Pinus maximinoi</i>	Biomasa = e ^(-3.193157 + 0.072731 DAP + 0.023269 Altura)	92%
<i>Pinus oocarpa</i>	Biomasa = e ^(0.98318 + 0.048111 DAP + 0.30011 Altura - 0.00555 Altura²)	99%
<i>Pinus caribaea</i>	Biomasa = e ^(0.53223 + 0.314869 DAP - 0.01499 Altura - 0.00357 DAP²)	98%
Coníferas	Biomasa = e ^(1.737076 + 0.147573 DAP + 0.082182 Altura - 0.00148 Altura² - 0.00115 DAP²)	95%

Biomasa en Kilogramos, DAP en centímetros y Altura en metros.

Como puede observarse en el Cuadro 7, las ecuaciones elegidas para las especies en estudio tienen un ajuste bastante alto en los tres casos, el indicativo de la precisión de un modelo es el coeficiente de determinación (R²), el cual indica el grado en que dicho modelo es capaz de explicar la variación en la estimación de biomasa total por encima del suelo.

En el caso de *Pinus maximinoi*, el modelo generado para estimar biomasa presentó un coeficiente de determinación de 0.92, lo cual indica que el modelo puede explicar un 92 % de la variación en biomasa total estimada, este es un porcentaje más que aceptable, debido a que en experimentos e investigaciones biológicas se considera confiable obtener un coeficiente de determinación arriba del 60%³. Para *Pinus oocarpa* y *P. caribaea* se tienen

³ Ing. Mario Paiz. 2001. Coeficiente de determinación. Programa de Incentivos Forestales, Inab. Comunicación personal.

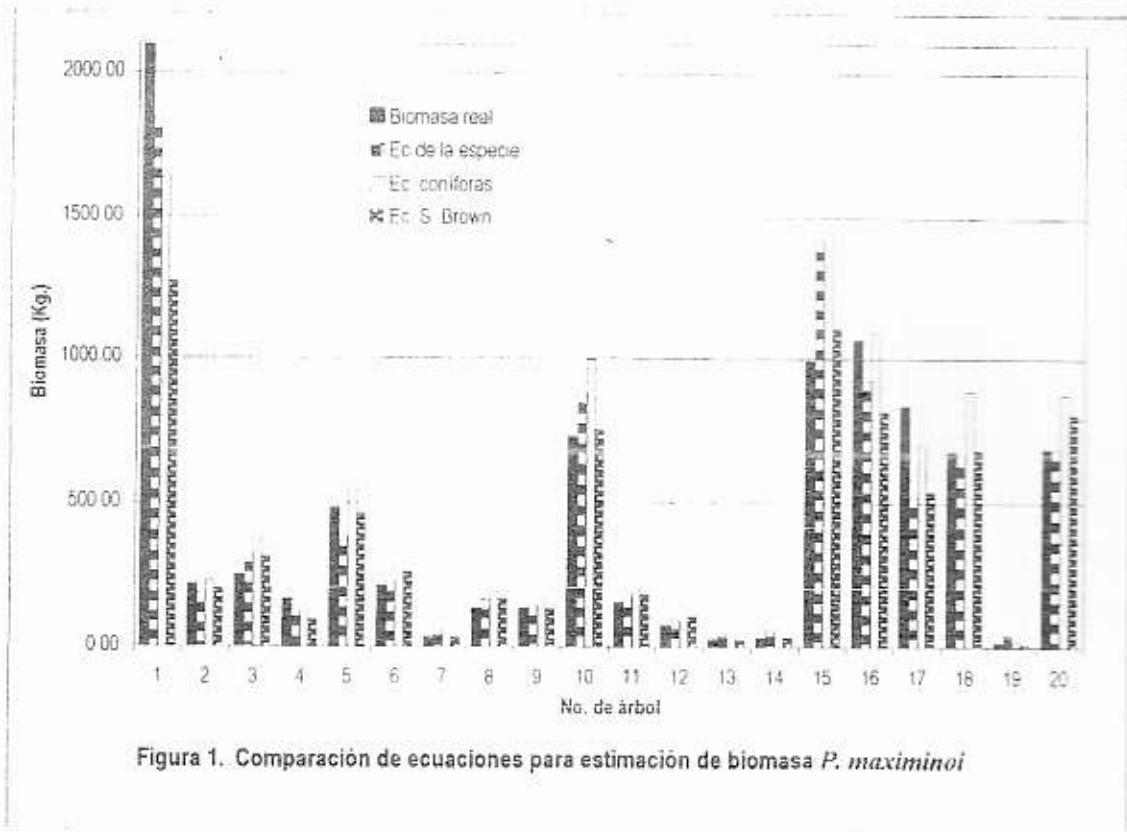
coeficientes de determinación de 0.99 y de 0.98, respectivamente, los cuales también se acercan bastante a la unidad, o sea, casi el 100% de la variación de los datos puede ser explicada por los modelos. De esta forma se tiene que los modelos generados para las especies en mención, son modelos bastante precisos para la estimación de biomasa total por encima del suelo.

Luego de generar un modelo para cada una de las especies, los 60 datos obtenidos de las especies en estudio (*Pinus maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. caribaea*), se introdujeron al programa STATISTICA (30) para generar un modelo que pueda ser utilizado de manera general para estimar biomasa de cualquiera de estas especies y, como no existen modelos para otras especies de coníferas, este podría ser utilizado también en estos casos, teniendo en cuenta que ha sido originado solamente con datos de las tres especies ya mencionadas. La idea de generar este modelo, surgió simplemente para aprovechar los datos que ya se tenían y, además, de la necesidad existente de modelos para estimar biomasa en especies del país. El modelo obtenido fue también de tipo exponencial y presentó un R^2 de 0.95, el cual indica que también este modelo es bastante preciso (ver al final del Cuadro 7). Debido a que en la actualidad no existen otros modelos generados para especies y condiciones de Guatemala, este modelo puede ser de gran utilidad a partir de este estudio, tomando en cuenta que se han utilizado modelos para estimación de biomasa generados con especies de otros países y en condiciones muy distintas, por la mencionada falta de estudios realizados en el país. En todos los casos, debe tenerse la precaución de no estimar biomasa para plantaciones cuyos DAP y/o Altura estén fuera del rango utilizado en el presente estudio.

En las siguientes páginas se presentan gráficos que comparan los resultados de biomasa real obtenida con datos de campo, la biomasa calculada con los modelos generados para cada especie y con el modelo para coníferas también generado en el presente estudio, así como con el modelo para coníferas generado por Sandra Brown (3 y 13).

En los Cuadros 8, 9 y 10 puede observarse que los resultados de la estimación de biomasa con las diferentes ecuaciones son bastante similares, lo cual puede corroborarse en las Figuras 1, 2 y 3; aunque como es de esperarse, por el error experimental de cada modelo, algunos valores son subestimados o sobreestimados y otros se acercan bastante al valor real obtenido. Sin embargo, como ya se hizo notar anteriormente, los modelos generados en este estudio son bastante confiables, tal y como lo demuestran su coeficiente de determinación (R^2) y las gráficas ya mencionadas.

Además de la comparación de biomasa real contra estimada por las diferentes ecuaciones, en los Cuadros 8, 9 y 10, puede observarse que los datos están ordenados respecto a su diámetro a la altura de pecho (DAP), aunque para



MODELOS:

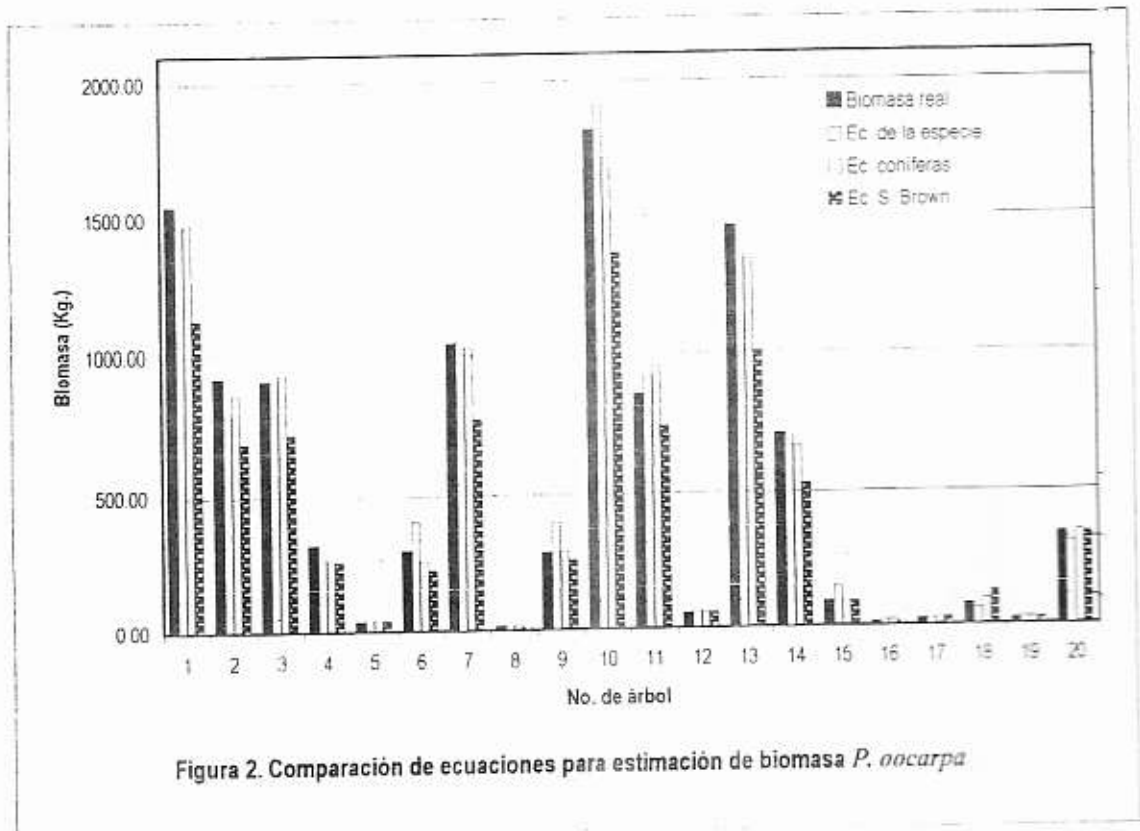
P. maximinoi: Biomasa = $e^{(3.193157 + 0.072731 \text{ DAP} + 0.023289 \text{ Altura})}$

Sandra Brown: Biomasa = $e^{(-1.17 + 2.119 * (\ln \text{ DAP}))}$

Ec. Coníferas: Biomasa = $e^{(1.737076 + 0.147573 \text{ DAP} + 0.082162 \text{ Altura} - 0.00148 \text{ Altura}^2 - 0.00115 \text{ DAP}^2)}$

Cuadro 8. Estimación de biomasa comparando distintos modelos de estimación para *P. maximinoi*.

Árbol	DAP	Altura	Biomasa real	Ec. de la especie	Ec. coníferas	Ec. S. Brown
19	5.20	7.00	11.51	41.86	19.61	10.21
13	7.80	8.00	24.21	51.77	29.40	24.11
14	9.00	8.00	27.02	56.49	34.29	32.65
7	9.00	14.00	29.77	64.96	46.18	32.65
4	15.00	28.00	164.85	139.24	125.55	96.39
12	16.00	10.00	72.36	98.47	88.03	110.51
9	17.60	23.00	133.59	149.74	161.65	135.24
8	19.80	21.50	133.74	169.69	198.53	173.58
11	20.60	21.00	154.52	177.77	213.20	188.78
2	21.60	20.25	216.10	187.87	231.69	208.73
6	24.10	20.50	209.89	226.65	295.42	263.25
3	26.20	30.00	250.48	329.44	382.81	314.24
5	31.40	20.50	477.53	385.42	544.45	461.18
17	33.80	26.00	829.75	521.64	697.49	539.08
18	37.70	24.00	669.53	661.20	885.35	679.43
10	39.50	30.30	722.07	872.78	995.52	750.01
20	40.80	15.80	679.22	684.40	873.69	803.28
16	41.00	28.00	1062.03	922.62	1091.38	811.64
15	47.40	26.50	989.18	1419.08	1460.82	1103.70
1	50.65	27.50	2088.61	1839.83	1639.53	1270.22



MODELOS:

P. oocarpa: Biomasa = $e^{(0.98318 + 0.048111 \text{ DAP} + 0.30011 \text{ Altura} - 0.00555 \text{ Altura}^2)}$

Sandra Brown: Biomasa = $e^{(-1.17 + 2.119 \cdot (\text{Ln DAP}))}$

Ec. Coníferas: Biomasa = $e^{(1.737076 + 0.147573 \text{ DAP} + 0.082182 \text{ Altura} - 0.00148 \text{ Altura}^2 - 0.00115 \text{ DAP}^2)}$

Cuadro 9. Estimación de biomasa comparando distintos modelos de estimación para *P. oocarpa*.

Árbol	DAP	Altura	Biomasa real	Ec. de la especie	Ec. coníferas	Ec. S. Brown
8	5.70	5.50	11.05	15.49	19.07	12.40
16	6.00	6.50	9.75	19.85	21.17	13.83
19	7.50	8.00	17.84	29.66	28.27	22.19
17	8.50	7.00	18.80	25.05	30.30	28.93
5	10.00	9.00	35.13	41.09	41.16	40.82
12	12.00	11.00	52.47	66.03	58.40	60.07
15	14.70	15.50	90.47	149.71	97.14	92.35
18	17.30	9.50	77.08	64.44	98.80	130.41
6	22.40	22.50	298.19	404.91	261.26	225.45
4	23.90	17.00	321.32	278.93	264.16	258.64
9	23.90	21.00	284.37	398.53	293.04	258.64
20	27.20	16.50	337.55	308.78	348.39	340.19
14	33.50	23.00	706.26	707.32	663.45	528.99
2	38.00	21.00	919.22	785.37	860.40	690.93
3	38.80	23.00	907.16	912.75	933.46	722.12
11	39.30	22.50	846.86	912.99	953.73	741.96
7	40.00	25.50	1035.00	1044.75	1025.84	770.27
13	45.30	26.00	1459.00	1357.86	1337.40	1002.65
1	47.90	30.00	1548.70	1474.39	1481.35	1128.51
10	52.40	26.00	1820.82	1910.76	1717.34	1365.02

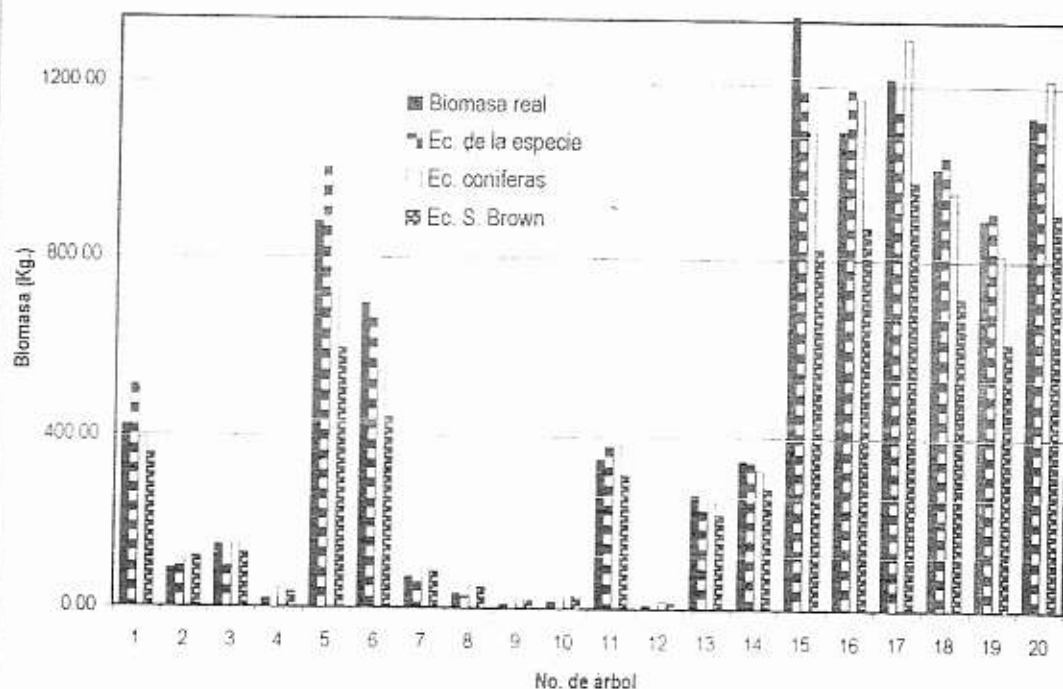


Figura 3. Comparación de ecuaciones para estimación de biomasa *P. caribaea*

MODELOS:

P. caribaea: Biomasa = $e^{(0.53223 + 0.314869 \text{ DAP} - 0.01499 \text{ Altura} - 0.00367 \text{ (DAP)})}$

Sandra Brown: Biomasa = $e^{(1.17 + 2.119 \cdot (\text{Ln DAP}))}$

Ec. Coníferas: Biomasa = $e^{(1.737076 + 0.147573 \text{ DAP} + 0.082182 \text{ Altura} - 0.00146 \text{ Altura}^2 - 0.00115 \text{ DAP}^2)}$

Cuadro 10. Estimación de biomasa comparando distintos modelos de estimación para *P. caribaea*.

Árbol	DAP	Altura	Biomasa real	Ec. de la especie	Ec. coníferas	Ec. S. Brown
12	5.70	5.50	9.00	8.40	19.07	12.40
9	6.90	5.50	10.66	11.62	22.37	18.60
10	8.40	7.50	17.72	16.66	30.84	28.21
4	9.60	12.25	21.70	20.95	46.17	37.44
8	10.80	11.75	34.10	28.23	52.35	48.05
7	14.20	13.25	72.86	59.44	83.92	85.82
2	16.50	14.50	89.57	93.53	114.37	117.96
3	17.00	20.50	144.65	94.25	144.93	125.66
13	22.20	21.25	265.91	231.45	250.76	221.21
14	24.90	21.50	346.26	342.66	324.22	282.11
11	26.10	25.50	348.86	378.47	379.41	311.70
1	27.80	19.00	422.60	513.75	394.66	356.29
6	30.80	23.00	697.07	664.33	543.84	442.70
5	35.50	20.00	881.66	1003.44	719.29	598.15
19	36.00	28.50	894.11	910.12	811.89	616.14
18	38.60	28.25	1008.80	1036.44	953.80	714.26
15	41.30	24.50	1364.12	1187.67	1091.59	824.28
16	42.50	25.50	1093.20	1192.26	1170.30	875.85
20	43.30	30.00	1128.96	1122.15	1217.22	911.16
17	44.80	29.00	1218.31	1139.70	1311.40	979.34

la elaboración de las gráficas respectivas esta variable no se tomó en cuenta. Al observar dichos cuadros, puede notarse que a medida que el DAP aumenta, la biomasa lo hace también. Existen algunas excepciones, tal y como los árboles 12 y 20 de *P. maximinoi*, el árbol 18 de *P. oocarpa* y el árbol 19 de *P. caribaea*, los cuales poseen biomasa menor a las de sus antecesores, a pesar de poseer diámetros mayores. Si se observa con detenimiento los datos de estos árboles excepcionales y se compara cada uno con su respectivo antecesor, puede notarse que la altura tiene su influencia también sobre la biomasa. Sucede que, aunque su diámetro es mayor, la altura es mucho menor respecto al árbol que lo antecede, por lo cual su biomasa también es menor; probablemente se trataba de árboles en sitios con condiciones especiales que afectaban su crecimiento en altura, aunque no en diámetro.

En la mayoría de casos, ambas variables, DAP y altura del árbol, se relacionan proporcionalmente con la biomasa. Ambas ocasionan aumento o reducción en la biomasa, según aumentan o disminuyen ellas mismas, aunque la relación no es directamente proporcional, tal y como lo muestran las Figuras 4, 5 y 6 en las páginas siguientes. Se agregó una línea de tendencia exponencial a las gráficas, la cual se adapta bastante bien a la dispersión de los datos, ya que estos se distribuyen a ambos lados de la línea; esto último también puede observarse en las figuras ya mencionadas.

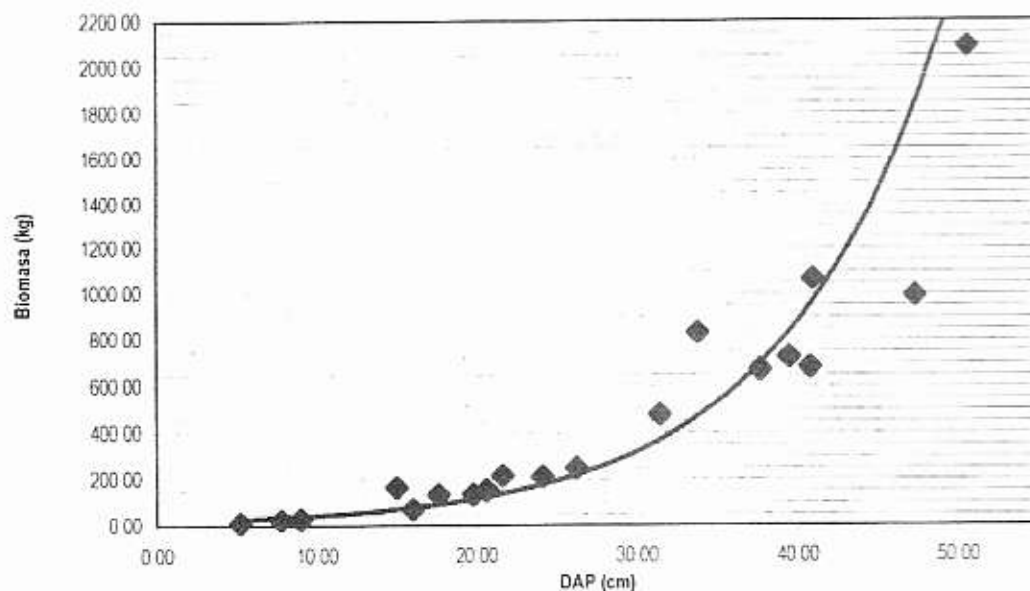


Figura 4. Relación DAP - Biomasa para *Pinus maximinoi*

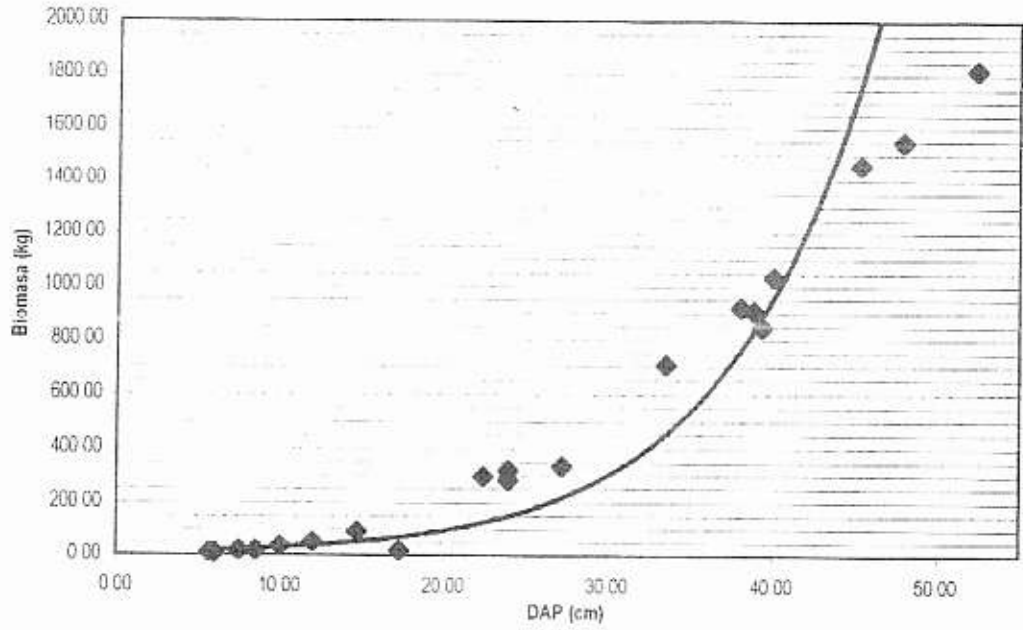


Figura 5. Relación DAP - Biomasa para *Pinus oocarpa*

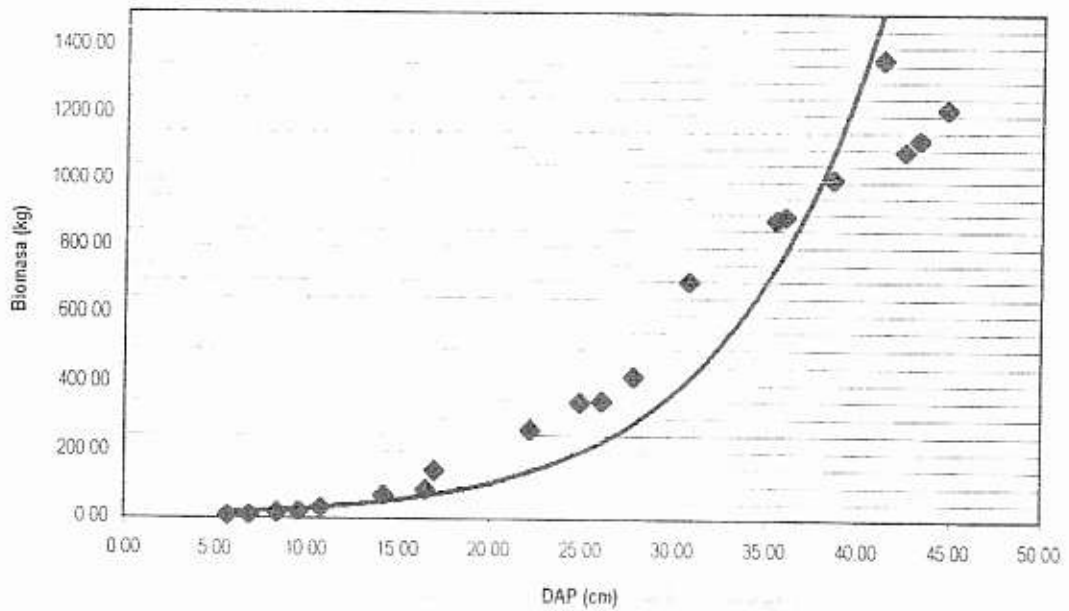


Figura 6. Relación DAP - Biomasa para *Pinus caribaea*

A continuación se presenta una serie de gráficas que muestran la relación existente entre las variables Altura y biomasa, para cada una de las especies en estudio (*Pinus maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. caribaea*). Además, en los cuadros 8, 9 y 10 se muestran los datos numéricos para dichas variables, ordenados respecto al DAP para presentar de una forma más clara la relación existente entre el DAP, la Altura y la biomasa.

De la misma manera que en la relación DAP – Biomasa, al graficar la relación Altura – Biomasa y agregarle una línea de tendencia exponencial, los datos se distribuyen en ambos lados de la línea, también puede observarse que algunos datos se ubican sobre la misma, como lo presentan las Figuras 7, 8 y 9 en las páginas anteriores. Los modelos generados en el presente estudio son de tipo exponencial, lo cual coincide con la dispersión de los datos para ambas relaciones (DAP – biomasa y Altura – biomasa) que se adapta a una línea exponencial, esto apoya la afirmación de que los modelos generados en este trabajo son suficientemente precisos para la estimación de biomasa por encima del suelo.

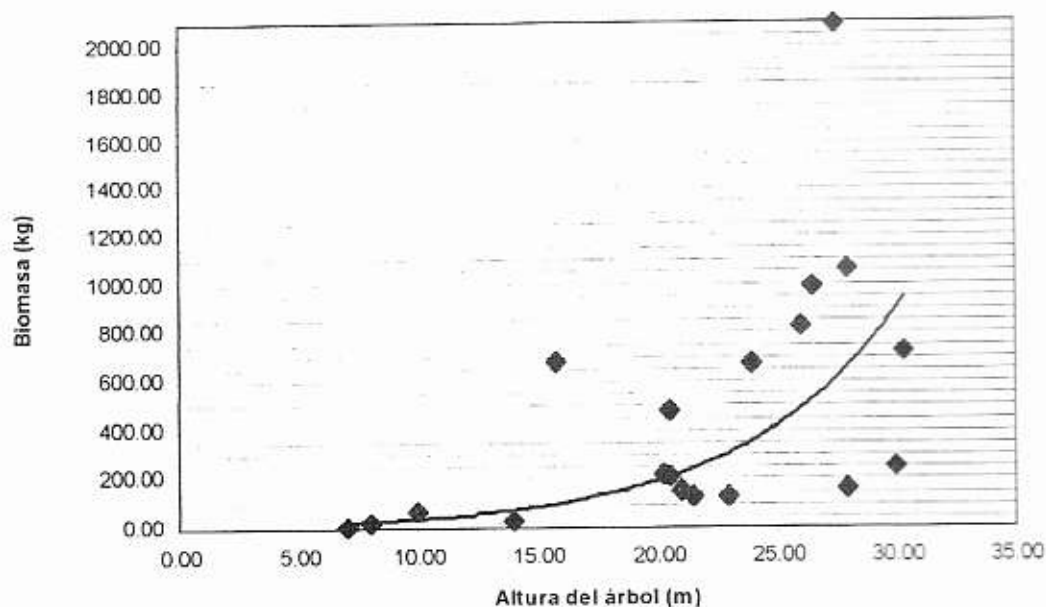


Figura 7. Relación Altura - Biomasa para *Pinus maximinoi*

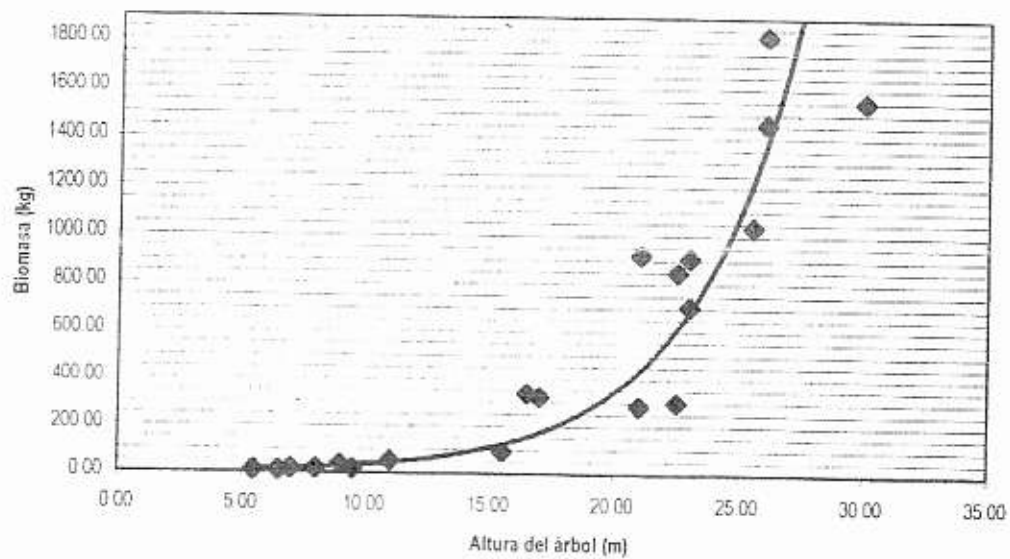


Figura 8. Relación Altura - Biomasa para *Pinus oocarpa*

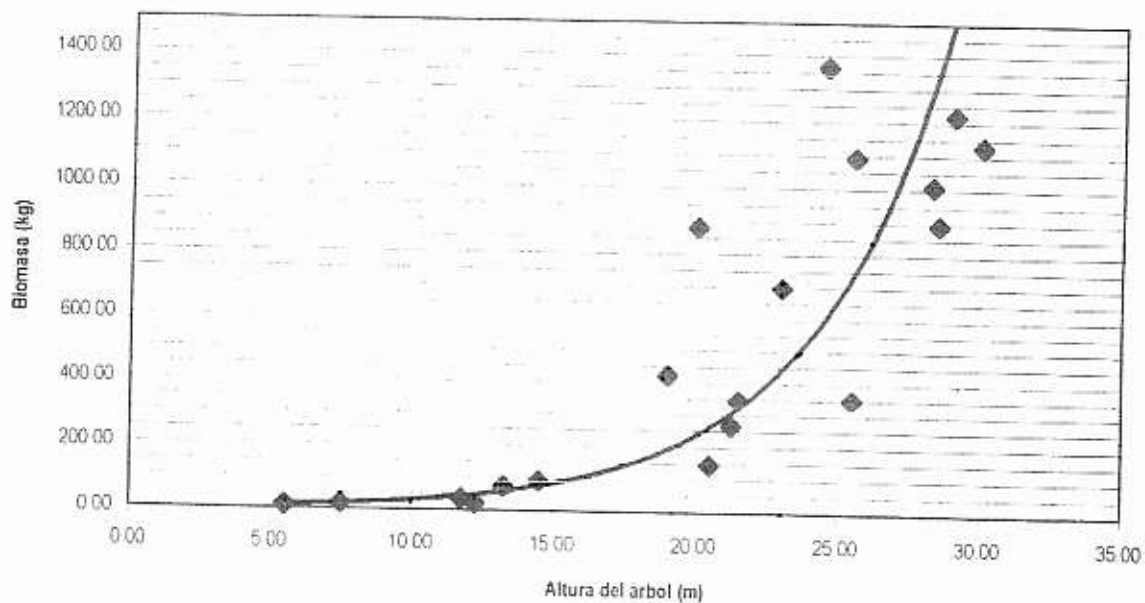


Figura 9. Relación Altura - Biomasa para *Pinus caribaea*

En las Figuras 10, 11 y 12 se presenta el comportamiento de los valores de biomasa obtenidos en el campo y los valores estimados por el modelo generado para cada una de las especies en estudio. Si los valores fueran iguales por ambos métodos, se esperaría que la gráfica fuera una línea recta, con ángulo de 45° respecto al origen; pero debido al error experimental que existe al estimar los datos utilizando las ecuaciones, los puntos no llegan a unirse, sino en lugar de ello se observan dispersos en el plano de la gráfica. La distribución de los puntos está dada por R^2 , lo que implica que si el R^2 fuese del cien por ciento, se tendría una línea recta de cuarenta y cinco grados, donde los valores observados serían iguales a los predichos por los modelos.

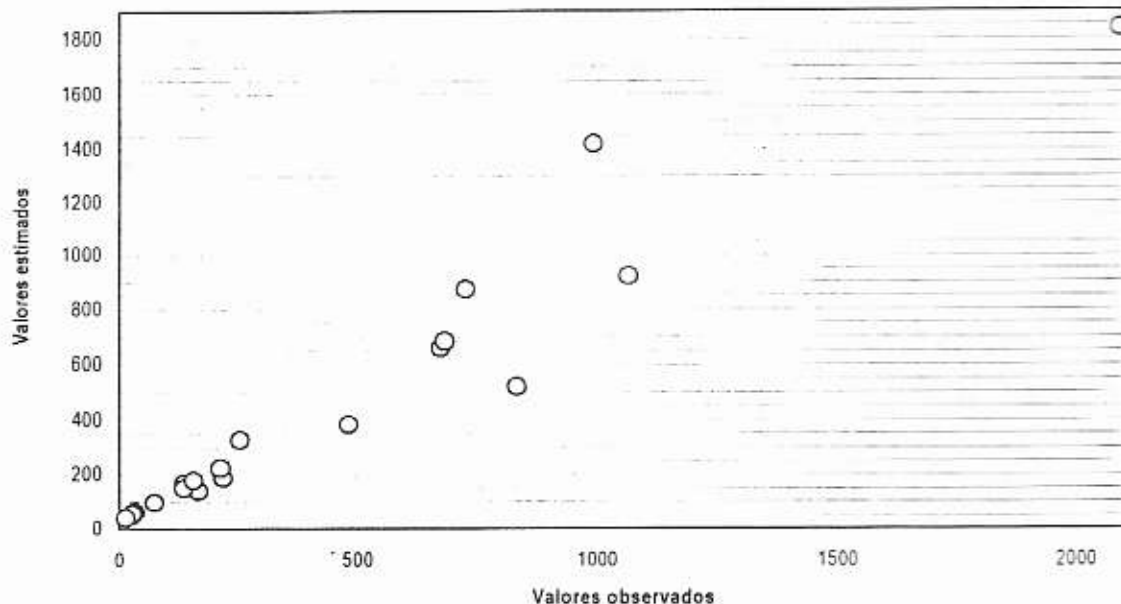


Figura 10. Correlación de biomasa real contra estimada para *P. maximinoides*

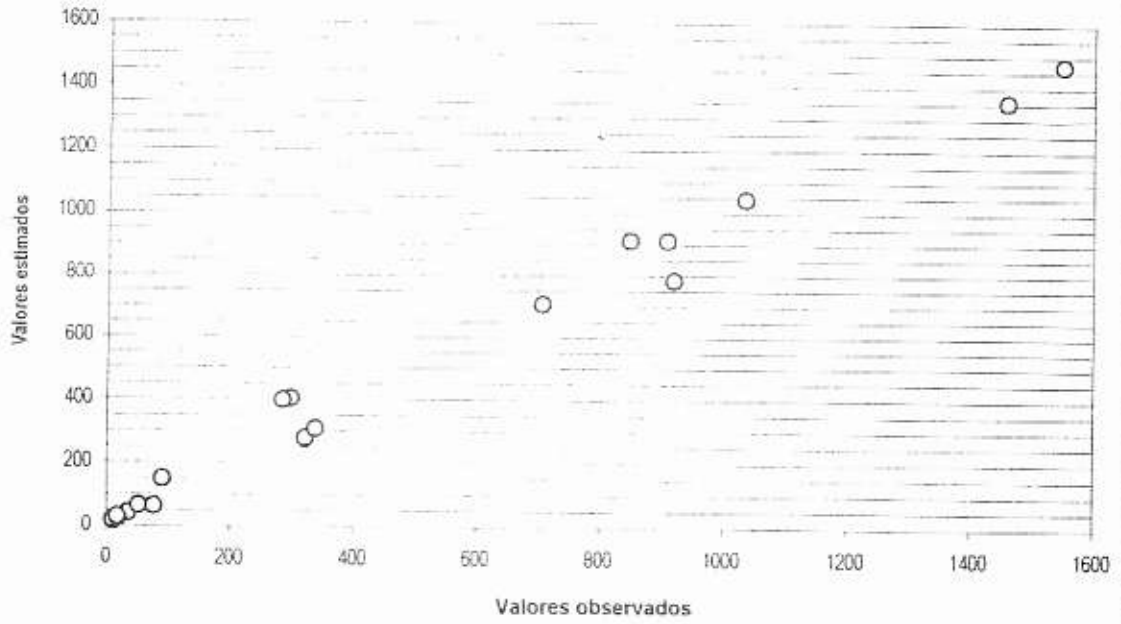


Figura 11. Correlación de biomasa real contra estimada para *P. oocarpa*

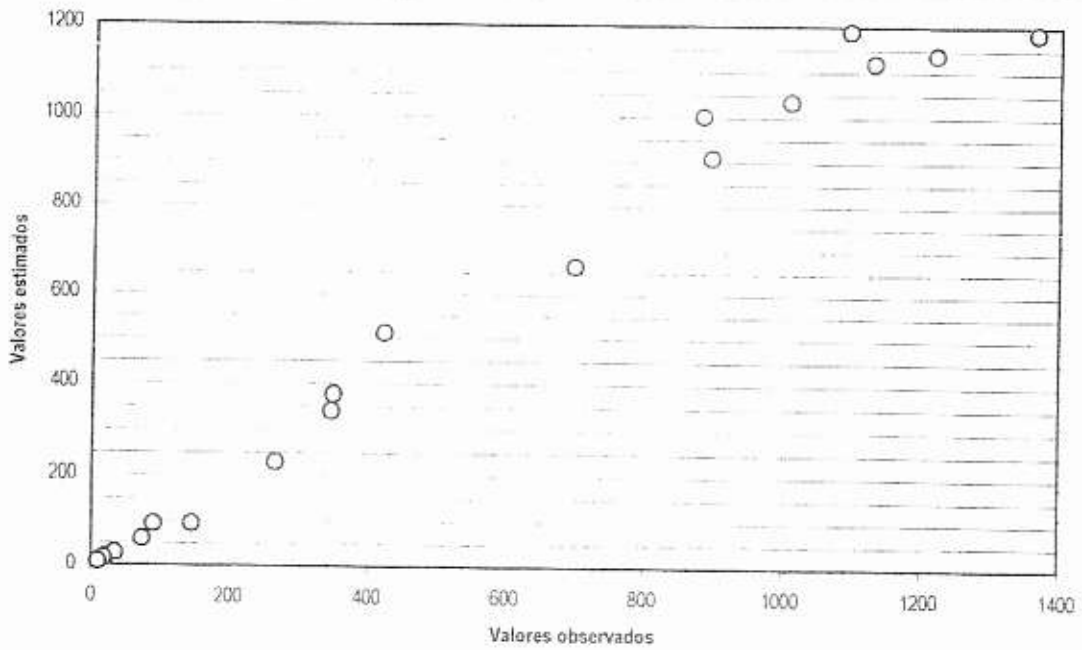


Figura 12. Correlación de biomasa real contra estimada para *P. caribaea*

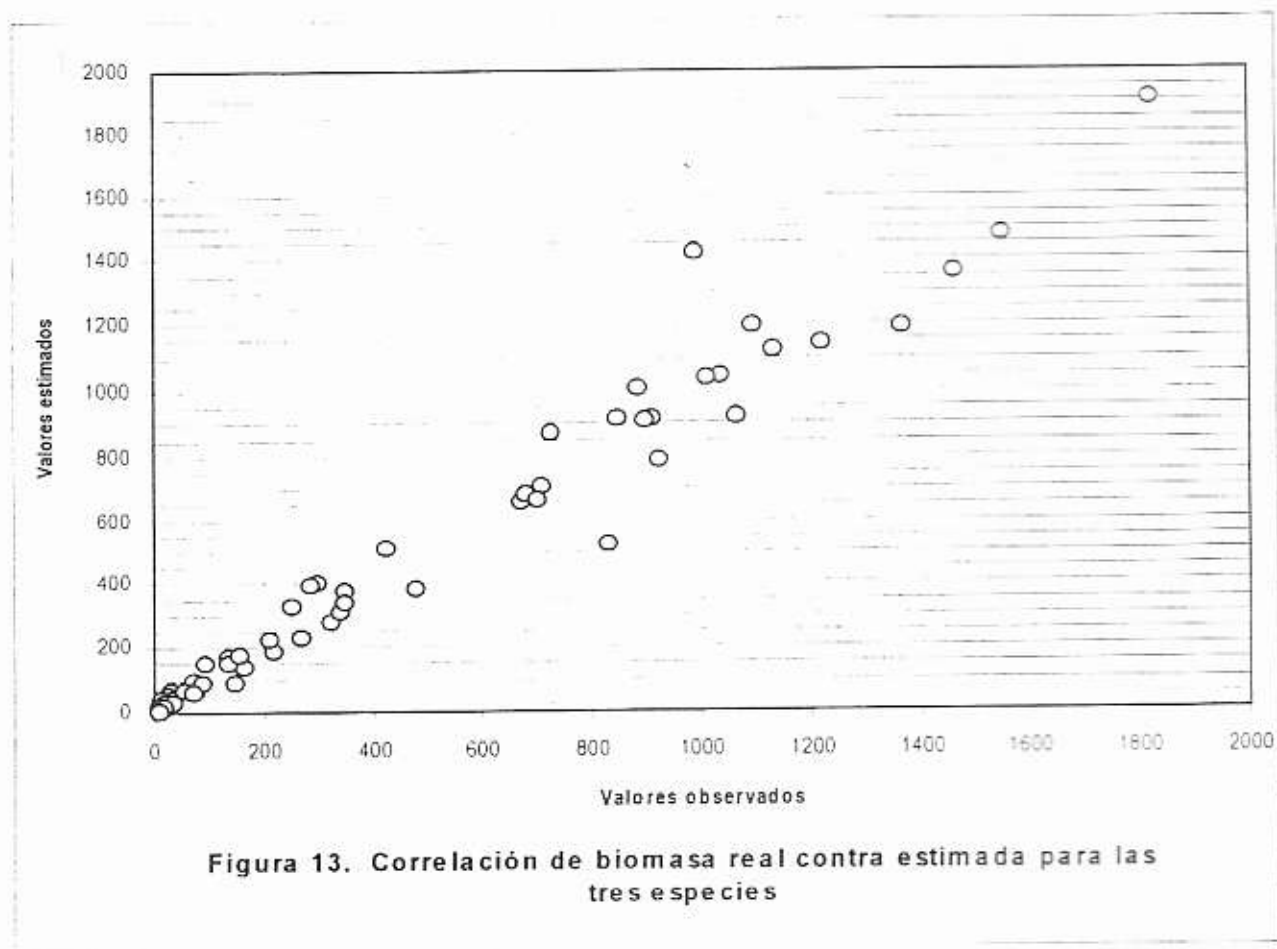


Figura 13. Correlación de biomasa real contra estimada para las tres especies

Al igual que en el caso de las especies individuales, la Figura 13 muestra la correlación de los valores reales obtenidos con datos de campo y los valores predichos por los modelos que se generaron en el presente estudio. Sin embargo en esta gráfica se combinan los puntos de las tres especies estudiadas (*Pinus maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. caribaea*). Puede notarse la distribución dada por el R^2 .

6.2 ESTIMACIÓN DE CARBONO

Como se indicó en la metodología, se calculó el Carbono en toneladas por árbol, utilizando la biomasa en kilogramos obtenida en campo y con el factor de Carbono 50% (0.5) que menciona la literatura (MackDicken, 1997) citado por Fundación Solar 2000. Cubero Moya (11) menciona que la fracción de carbono estimada para las especies estudiadas en su trabajo, es menor al 0.5 sugerido por la literatura, esto debido a que ese promedio se obtuvo a partir de datos de una gran variedad de especies. Aún así, para especies a las que aún no se ha cuantificado el Carbono que fijan por métodos directos, el 0.5 sugerido por la literatura sigue siendo válido para hacer esta estimación.

La estimación de Carbono por árbol para las especies de pino estudiadas se presenta en el Anexo 2. Como podrá notarse en dichos cuadros, la cantidad de Carbono por árbol es insignificante al momento de presentar y/o tratar de vender un proyecto para fijación de Carbono, de ahí que esta estimación se hizo a manera de ejercicio, pues debido a que el muestreo fue selectivo, no se tiene la medida de superficie de una parcela; además los datos fueron tomados en bosques naturales, donde los diámetros y alturas son muy variables. Para facilitar la revisión de los datos que aparecen en el Anexo 2, se realizó un promedio de carbono por clase diamétrica y por especie, lo cual se presenta en el Cuadro 11; de acuerdo con dicho Cuadro, para todas las especies a medida que aumenta el tamaño del árbol, la cantidad de biomasa y el Carbono fijado aumentan también. Aunque no se estableció la variación o la tendencia de fijación al aumentar el tamaño del árbol, se considera que la fijación va aumentando de árboles de categorías diamétricas bajas a árboles de mayor tamaño, disminuyendo conforme el árbol llega a su madurez, tal y como ocurre con las tasas de crecimiento.

Para hacer un inventario de carbono en bosques naturales, sería necesario tener un inventario de los árboles presentes en una parcela de dimensión conocida o datos de densidades promedio para ese tipo de bosque, así poder generalizar los datos por hectárea, que sería como interesaría presentarlos para un proyecto. En el Ejemplo 1 se presenta el cálculo de Carbono en una plantación, utilizando datos de lo que sería una plantación manejada de forma ideal.

Cuadro 11. Contenido de Carbono en cada especie por clases diamétricas.

Especie	Clase diamétrica	Biomasa total por encima del suelo (g)	DAP Promedio (cm)	Altura promedio (m)	Carbono promedio Ton/árbol
<i>Pinus maximinoi</i>	7.5	23.13	7.75	9.25	0.011565
	15	126.14	17.10	19.37	0.063068
	25	207.75	23.13	22.94	0.103874
	35	674.72	35.60	25.20	0.337360
	45	1204.76	44.96	24.45	0.602379
<i>Pinus oocarpa</i>	7.5	14.36	6.93	6.75	0.007179
	15	49.22	13.50	11.25	0.058783
	25	310.36	24.35	19.25	0.155178
	35	844.88	37.40	22.38	0.422438
	45	1465.88	46.40	26.88	0.732940
<i>Pinus caribaea</i>	7.5	14.77	7.65	7.69	0.007385
	15	85.30	14.63	15.00	0.042648
	25	345.91	25.25	21.81	0.172954
	35	870.41	35.23	24.94	0.435204
	45	1201.15	42.98	27.25	0.600573

Ejemplo 1. A continuación se presenta un ejemplo de estimación del Carbono fijado, los datos utilizados no son reales, sino para una plantación de 10 años de edad, idealmente manejada. Se utilizó el modelo generado en esta investigación para una especie en particular.

Asumiendo que se tuviera una plantación de *Pinus caribaea* de 10 años de edad, con una extensión de 1500 ha, un DAP promedio de 16 cm y una altura promedio de 15 m, densidad de 700 árboles/ha, y tomando el factor de 0.5 de Carbono, el comportamiento de la plantación en relación al Carbono fijado sería de la siguiente forma:

Ecuación para esa especie: $Biomasa = e^{(0.53223 + 0.314869 \text{ DAP} - 0.01499 \text{ Altura} - 0.00357 \text{ DAP}^2)}$

Biomasa = **85.32 Kg**

85.32 Kg * 0.5 = **42.66 Kg de Carbono/árbol**

42.66 Kg de Carbono/árbol * 1ton/1000 Kg * 700 arb/ha = **29.86 TonC/ha.**

29.86 TonC/ha * 1500 ha = **44,793 TonC**

Esta plantación ha fijado en sus 10 años de vida, 44,793 Toneladas de Carbono. Para obtener lo que fija por año, podría dividirse dentro de la edad de la plantación, obteniendo que fija un total de 4,479.30 TonC/año, relacionándolo por hectárea fija 2.99 TonC/ha/año. Para obtener un dato más exacto del incremento anual y estudiar el comportamiento de la fijación de Carbono, determinar si se fija más en árboles jóvenes o adultos, sería necesario tener datos de incrementos anuales en DAP y Altura, para calcular incremento de biomasa y en base a la misma, obtener el Carbono fijado por año.

6.3 FACTOR DE EXPANSIÓN DE BIOMASA

El factor de expansión de biomasa se calculó relacionando la biomasa total y la biomasa del fuste, esto pretende crear un factor que corrija datos de inventarios forestales. Al elaborar inventarios forestales con fines comerciales, solamente se toman en cuenta las variables diámetro a la altura de pecho (DAP) y Altura del árbol en pie, para obtener el volumen de madera que existe en un área; pero al trasladar este volumen a biomasa, se desprecia la biomasa acumulada en hojas, ramas y ramillas. Debido a que en la presente investigación se ha pretendido crear modelos que estimen biomasa aérea total a partir de datos de inventarios forestales, se hace necesario crear también un factor que sea útil en la corrección de éstos y tomar en cuenta así, la biomasa que se almacena en ramas, ramillas y hojas. En el Cuadro 12 se presenta el factor de expansión de biomasa (FEB) para cada una de las especies estudiadas.

Cuadro 12. Factor de expansión de biomasa por especie.

ESPECIE	n	FEB	St Dv
<i>Pinus maximinoi</i>	20	1.19	0.10
<i>Pinus oocarpa</i>	20	1.22	0.11
<i>Pinus caribaea</i>	20	1.12	0.05

La manera de utilizar este factor es muy sencilla, ya que la biomasa del fuste (obtenida con las ecuaciones de la especie y las variables DAP y Altura en pie) se multiplica por el factor y al resultado se le resta la misma. La operación sería:

$$\text{Biomasa del follaje} = (\text{Biomasa del fuste} * \text{FEB}) - \text{Biomasa del fuste}$$

Los factores de expansión de biomasa presentados en el cuadro anterior se obtuvieron como un promedio de los árboles medidos para cada especie (Ver Anexo 3). Y cada uno de ellos es el resultado de dividir la biomasa total del árbol dentro de la biomasa del fuste.

7. CONCLUSIONES

- 7.1 Con la metodología destructiva empleada en el presente estudio se logró cuantificar la biomasa total por encima del suelo de las tres especies propuestas (*Pinus maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. caribaea*), lo que permitió la generación de modelos exponenciales para la estimación de dicha variable, utilizando datos de inventarios forestales, tales como diámetro a la altura de pecho (DAP) y altura del árbol en pie; esas últimas como variables independientes. Los modelos obtenidos presentaron coeficientes de determinación por encima del 90%, lo que indica que son lo suficientemente precisos para dicha estimación. Dichos modelos son los siguientes: para *Pinus maximinoi* es $Biomasa = e^{(3.193157 + 0.072731 \text{ DAP} + 0.023289 \text{ Altura})}$ con un R^2 del 92%. En el caso de *Pinus oocarpa*, es $Biomasa = e^{(0.99318 + 0.048111 \text{ DAP} + 0.30011 \text{ Altura} - 0.00555 \text{ Altura}^2)}$, con un R^2 del 99%. Y en *Pinus caribaea*, $Biomasa = e^{(0.53223 + 0.314869 \text{ DAP} - 0.01499 \text{ Altura} - 0.00357 \text{ DAP}^2)}$, y su R^2 es 98%. Las variables están dadas en las siguientes unidades: Biomasa en Kilogramos, DAP en centímetros y Altura en metros.
- 7.2 A partir de los datos tomados de las tres especies en estudio (*Pinus maximinoi*, *P. oocarpa* y *P. caribaea*) se creó un modelo general para la estimación de biomasa en coníferas ($Biomasa = e^{(1.737076 + 0.147573 \text{ DAP} - 0.082182 \text{ Altura} - 0.00148 \text{ Altura}^2 - 0.00115 \text{ DAP}^2)}$), el cual es el primer modelo creado con especies y condiciones de Guatemala. Este modelo presenta un coeficiente de determinación bastante alto (95 %), o sea, es considerado un modelo confiable para estimar biomasa.
- 7.3 Con los datos de biomasa se logró generar un factor de expansión de biomasa para corregir datos de inventarios forestales en los cuales se desprecia la biomasa contenida en ramas, ramillas y hojas. Los factores obtenidos son, para *Pinus maximinoi* = 1.19, para *P. oocarpa* = 1.22 y para *P. caribaea* = 1.12.
- 7.4 Teniendo el cálculo de la biomasa por árbol, el procedimiento para estimar Carbono es muy sencillo, pero se hace necesario tener a mano algunos datos como extensión de la parcela de medición, número de árboles

dentro de la misma, DAP y altura promedio en el caso de plantaciones; en el caso de bosque natural es necesario tener datos de todos los árboles para hacer un estimado del Carbono que hay fijado en cierta extensión de terreno, o bien, tener datos de densidades promedio.

- 7.5 Este documento proporciona material bibliográfico que sirve de base metodológica para el desarrollo de investigaciones relacionadas con el tema.

8. RECOMENDACIONES

- 8.1 Los modelos generados pueden ser utilizados en la realización de inventarios de Carbono para las especies estudiadas, y esto servir de base a la promoción de proyectos para la venta de fijación de carbono a nivel internacional. Debe tenerse precaución de no estimar biomasa para plantaciones cuyos DAP y/o Altura estén fuera del rango utilizado en el presente estudio.
- 8.2 Debido a que los modelos generados por el presente estudio se crearon a partir de datos tomados en sitios específicos, y no en todas las áreas donde se encuentran distribuidas las especies, se recomienda no tomarlos como absolutos y en la medida de lo posible, incrementar el tamaño de muestras, obteniendo datos en otras áreas con condiciones distintas para cada especie y reestimar los modelos respectivos, con lo cual se amplía el rango de validez.
- 8.3 Generar ecuaciones de estimación de biomasa para otras especies de coníferas de importancia en Guatemala. Además, en el presente estudio se generó un modelo general para coníferas, esto se realizó tomando solamente tres de las aproximadamente 14 especies existentes en el territorio guatemalteco, por lo que es recomendable ampliarlo incluyendo en el análisis datos del resto de especies.
- 8.4 Resultaría muy interesante recalcular las estimaciones de carbono en los Bosques de Guatemala, estudio realizado por Pedro López (21), utilizando las ecuaciones generadas en la presente investigación.
- 8.5 En futuros estudios relacionados con el tema, es recomendable incluir, además de las variables DAP y altura, la variable edad del árbol como variable predictora.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. ACUERDOS SOBRE protocolo de Kioto. 2001. Acuerdos sobre protocolo de Kioto. Prensa Libre, Guatemala (Gua.); Nov. 12: 66.
2. BARRENA, V.; DANCE, J.; SAENZ, D. 1986. Metodología para la selección de ecuaciones de volumen. Revista Forestal del Perú (Perú) 13 (2):3-12.
3. BROWN, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests, a primer. Roma, Italia, FAO. 55 p.
4. CAILLIEZ, F. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento. Italia, FAO. 92 p. (Estudio FAO: Montes 22/1).
5. CASTELLANOS BOLAÑOS, J.F. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento en rodales coetáneos de *Pinus patula* en Zacatlán, Puebla. Tesis Mag. Sc. Chapingo, Méx., Colegio de Posgraduados. 75 p.
6. CATIE, PROSEFOR. 1997. *Pinus caribaea* Morelet var. hondurensis. Nota Técnica Sobre Manejo De Semillas Forestales (C.R.) no. 11: 2 p.
7. _____. 1997. *Pinus maximinoi* H.E. Moore. Nota Técnica Sobre Manejo De Semillas Forestales (C.R.) no. 14:2.
8. _____. 1997. *Pinus oocarpa* Schiede. Nota Técnica Sobre Manejo De Semillas Forestales (C.R.) no. 22: 2 p.
9. CONAF. 1998. El cambio climático global y el efecto de invernadero: "el rol de los bosques como mitigadores de las emisiones de CO₂". Chile, Corporación Nacional Forestal, Unidad de Medio Ambiente. 33 p.
10. CÓRDOVA LÓPEZ, A.L. 2000. Diagnóstico sobre situación actual del mecanismo de desarrollo limpio (MDL) en Guatemala. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 22 p.
11. CUBERO MOYA, J.A.; ROJAS PIEDRA S.R. 1999. Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea* Roxb.), teca (*Tectona grandis* L.f.) y pochote (*Bombacopsis quinata* Jacq.) en los cantones de Hojanca y Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. Tesis Lic. CC. Forestales. Heredia, C.R., Universidad Nacional, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Escuela de Ciencias Ambientales. p. irr.
12. FUNDACIÓN SOLAR. 2000. Elementos técnicos para inventarios de carbono en uso del suelo. Editado por Lilian Márquez. Guatemala. 33 p.
13. GALLOWAY, G. 1994. Dinámica de rodales. En: Curso Taller: Manejo Forestal y Establecimiento de Parcelas Permanentes en las Plantaciones de Coníferas de Guatemala (1994, Guatemala). Guatemala, MAGA/DIGEBOS/CATIE. 14 p.

14. GIRÓN HERNÁNDEZ, J.L. 1998. Distribución del volumen por producto para *Pinus maximinoi* H.E. Moore, en los departamentos de Alta y Baja Verapaz. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 70 p.
15. GODOY, J.C. 2001. Potencial de la venta de captura de carbono para el sector forestal. *Presentado en: Día Forestal (2001, Guatemala)*. Guatemala, Instituto Nacional de Bosques. 4 p.
16. GUATEMALA. INSTITUTO NACIONAL DE BOSQUES. 1999. *Pino candelillo*. Ficha Técnica De Especies (Gua.) no. 5; 2 p.
17. _____. 1999. *Pino caribe*. Ficha Técnica De Especies (Gua.) no. 2; 2 p.
18. _____. 1999. *Pino de ocote*. Ficha Técnica De Especies (Gua.) no.1; 2 p.
19. KREBS, C.J. 1985. Ecología. Trad. por Jorge Blanco. 2 ed. México, Harla. 753 p.
20. LAFACU. 2000. (<http://www.lafacu.com/apuntes/biologia/biomasa/>)
21. LÓPEZ, P. 1998. Potencial de carbono y absorción de dióxido de carbono de la biomasa en pie por encima del suelo en los bosques de la república de Guatemala. Guatemala, PAFG, INAB, CONAMA, CONAP. 64 p.
22. MACDICKEN, K. 1996. A guide to monitoring carbon sequestration in forestry and agroforestry projects. Arlington, USA, Winrock International Institute for Agricultural Development. 90 p.
23. MORALES RALDA, F.A. 2000. Estimación de una ecuación de biomasa para cuantificar el carbono que fija el árbol de hule (*Hevea brasiliensis*) en las plantaciones de la Costa Sur de Guatemala. Tesis Ing. Agr. Quetzaltenango, Gua., Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Occidente, Facultad de Agronomía. 69 p.
24. NETER, J. *et al.* 1996. Applied linear statistical models. 4 ed. Boston, USA, Irwin. 1408 p.
25. ORDÓÑEZ A., W. 1981. Producción y conservación de semilla de tres especies de *Pinus* importantes en Guatemala (*Pinus oocarpa* Schiede, *Pinus maximinoi* H.E. Moore y *Pinus caribaea* var *hondurensis* Bar. y Golf.). Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 82 p.
26. ORTIZ MALAVASI, E. 1989. Desarrollo de una técnica no destructiva para estimar biomasa en el bosque muy húmedo tropical. Cartago, Costa Rica, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Departamento de Ingeniería Forestal. 44 p.
27. PRADO CÓRDOVA, J.P. 2000. Segunda estimación de la producción y el rendimiento de semillas de cuatro especies de coníferas en ocho fuentes semilleras de Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 86 p.
28. SEMINARIO TALLER FORMULACIÓN Y DESARROLLO DE PROYECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO (1999, Guatemala). [Memoria], Guatemala, s.n. s.p.

29. SHAH, A. 1998. Global warming. (<http://www.globalissues.org/EnvIssues/GlobalWarming.asp>)
30. STAT SOFT. 2001. Tulsa, OK, USA. (<http://www.statsoft.com>).
31. UNITED NATIONS Framework Convention on Climate Change. 2000. (<http://www.unfccc.de/resource/cop3.html>).
32. WEFA. 2000. Global warming; the high cost of the Kyoto protocol. USA, American Petroleum Institute. (<http://www.api.org/globalclimate/wefastateimpacts.htm>).

Vo. Bo Fulando Barros.

APÉNDICE

Altura total

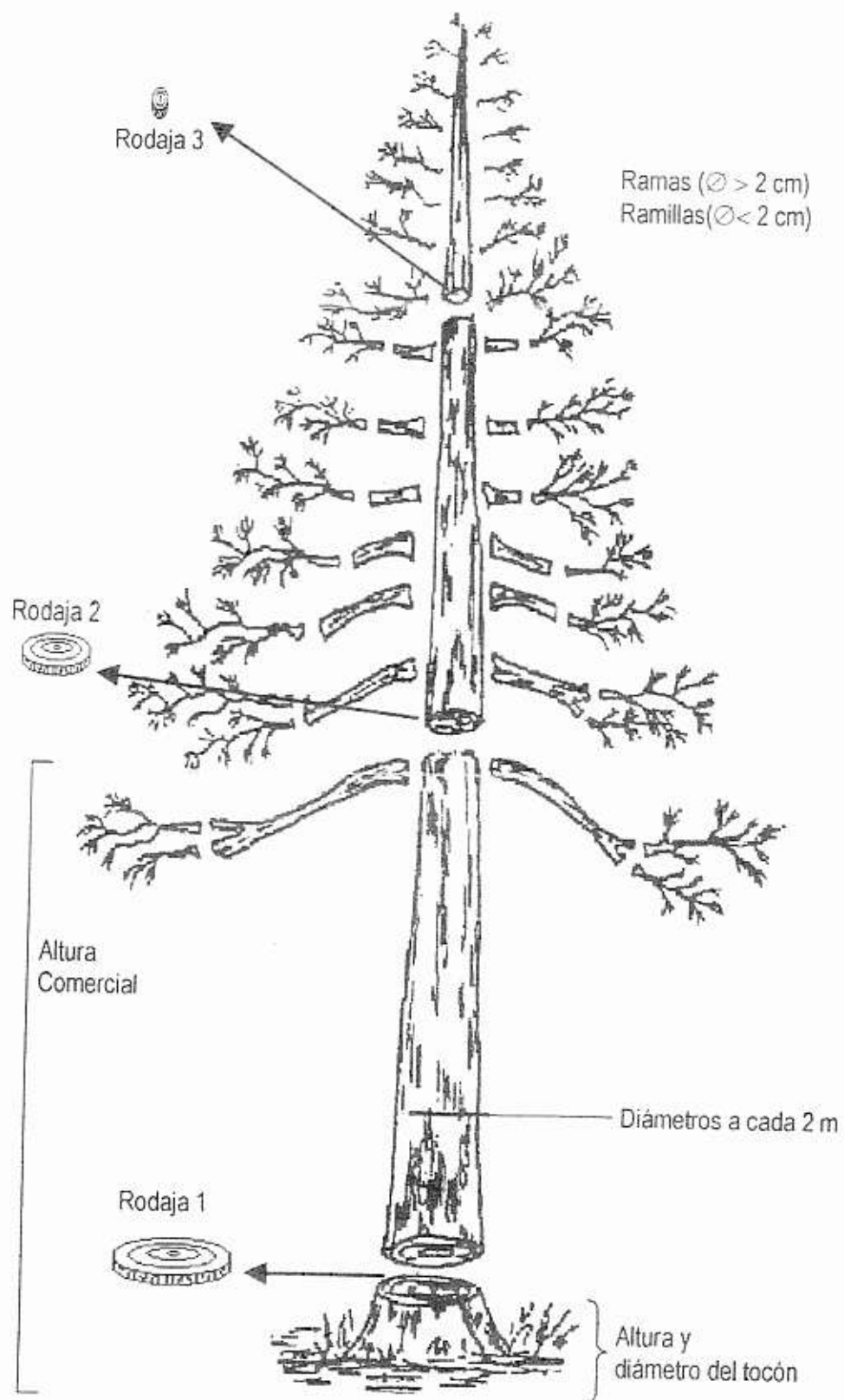


Figura 1 A. Muestreo del árbol.

VARIABLES BIOMASA, DAP, ALTURA Y CONTENIDO DE CARBONO POR ESPECIE Y POR ÁRBOL

Cuadro 1A. Carbono en toneladas por árbol *Pinus maximinoi*.

Árbol	Biomasa total por encima del suelo (kg)	DAP (cm)	Altura (m)	Carbono Ton/árbol
1	2088.61	50.65	27.50	1.044303
2	216.10	21.60	20.25	0.108052
3	250.48	26.20	30.00	0.125242
4	164.85	15.00	28.00	0.082425
5	477.53	31.40	20.50	0.238766
6	209.89	24.10	20.50	0.104944
7	29.77	9.00	14.00	0.014887
8	133.74	19.80	21.50	0.066871
9	133.59	17.60	23.00	0.066797
10	722.07	39.50	30.30	0.361037
11	154.52	20.60	21.00	0.077258
12	72.36	16.00	10.00	0.036180
13	24.21	7.80	8.00	0.012107
14	27.02	9.00	8.00	0.013511
15	989.18	47.40	26.50	0.494590
16	1062.03	41.00	28.00	0.531014
17	829.75	33.80	26.00	0.414873
18	669.53	37.70	24.00	0.334765
19	11.51	5.20	7.00	0.005753
20	679.22	40.80	15.80	0.339608

Cuadro 2A. Carbono en toneladas por árbol *Pinus oocarpa*.

Árbol	Biomasa total por encima del suelo (g)	DAP (cm)	Altura (m)	Carbono Ton/árbol
1	1548.70	47.90	30.00	0.774348
2	919.22	38.00	21.00	0.459609
3	907.16	38.80	23.00	0.453582
4	321.32	23.90	17.00	0.160660
5	35.13	10.00	9.00	0.017565
6	298.19	22.40	22.50	0.149094
7	1035.00	40.00	25.50	0.517500
8	11.05	5.70	5.50	0.005523
9	284.37	23.90	21.00	0.142184
10	1820.82	52.40	26.00	0.910408
11	846.86	39.30	22.50	0.423429
12	52.47	12.00	11.00	0.026234
13	1459.00	45.30	26.00	0.729502
14	706.26	33.50	23.00	0.353132
15	90.47	14.70	15.50	0.045236
16	9.75	6.00	6.50	0.004873
17	18.80	8.50	7.00	0.009400
18	18.80	17.30	9.50	0.009400
19	17.84	7.50	8.00	0.008921
20	337.55	27.20	16.50	0.168773

Cuadro 3A. Carbono en toneladas por árbol *Pinus caribaea*

Árbol	Biomasa total por encima del suelo (g)	DAP (cm)	Altura (m)	Carbono Ton/árbol
1	422.60	27.80	19.00	0.211300
2	89.57	16.50	14.50	0.044786
3	144.65	17.00	20.50	0.072324
4	21.70	9.60	12.25	0.010851
5	881.66	35.50	20.00	0.440828
6	697.07	30.80	23.00	0.348536
7	72.86	14.20	13.25	0.036431
8	34.10	10.80	11.75	0.017050
9	10.66	6.90	5.50	0.005331
10	17.72	8.40	7.50	0.008860
11	348.86	26.10	25.50	0.174429
12	9.00	5.70	5.50	0.004498
13	265.91	22.20	21.25	0.132955
14	345.26	24.90	21.50	0.173131
15	1364.12	41.30	24.50	0.682059
16	1093.20	42.50	25.50	0.546602
17	1218.31	44.80	29.00	0.609153
18	1008.80	38.60	28.25	0.504398
19	894.11	36.00	28.50	0.447055
20	1128.96	43.30	30.00	0.564480

DATOS PARA CÁLCULO DE FACTOR DE EXPANSIÓN DE BIOMASA

Cuadro 4A: Factor de expansión de biomasa para *Pinus maximinoi*.

Árbol	DAP	FUSTE	TOTAL	FEB
1	50.65	1699.39	2088.61	1.23
2	21.60	165.45	216.10	1.31
3	26.20	212.53	250.48	1.18
4	15.00	150.40	164.85	1.10
5	31.40	326.57	477.53	1.46
6	24.10	168.24	209.89	1.25
7	9.00	25.43	29.77	1.17
8	19.80	119.74	133.74	1.12
9	17.60	120.04	133.59	1.11
10	39.50	646.48	722.07	1.12
11	20.60	137.59	154.52	1.12
12	16.00	66.38	72.36	1.09
13	7.80	20.65	24.21	1.17
14	9.00	23.98	27.02	1.13
15	47.40	780.38	989.18	1.27
16	41.00	783.32	1062.03	1.36
17	33.80	677.47	829.75	1.22
18	37.70	557.09	669.53	1.20
19	5.20	9.74	11.51	1.18
20	40.80	618.36	679.22	1.10

Cuadro 5A: Factor de expansión de biomasa para *Pinus oocarpa*.

Árbol	DAP	FUSTE	TOTAL	FEB
1	47.90	1265.37	1548.70	1.22
2	38.00	771.08	919.22	1.19
3	38.80	690.30	907.16	1.31
4	23.90	289.94	321.32	1.11
5	10.00	31.69	35.13	1.11
6	22.40	265.18	298.19	1.12
7	40.00	805.89	1035.00	1.28
8	5.70	10.16	11.05	1.09
9	23.90	261.70	284.37	1.09
10	52.40	1531.84	1820.82	1.19
11	39.30	691.72	846.86	1.22
12	12.00	45.06	52.47	1.16
13	45.30	1129.11	1459.00	1.29
14	33.50	520.59	706.26	1.36
15	14.70	65.34	90.47	1.38
16	6.00	9.03	9.75	1.08
17	8.50	15.50	18.80	1.21
18	17.30	53.35	77.08	1.44
19	7.50	15.62	17.84	1.14
20	27.20	257.58	337.55	1.31

Cuadro 6A: Factor de expansión de biomasa para *Pinus caribaea*.

Arbol	DAP	FUSTE	TOTAL	FEB
1	27.80	351.09	422.60	1.20
2	16.50	80.16	89.57	1.12
3	17.00	141.10	144.65	1.03
4	9.60	20.36	21.70	1.07
5	35.50	741.88	881.66	1.19
6	30.80	611.61	697.07	1.14
7	14.20	69.02	72.86	1.06
8	10.80	31.22	34.10	1.09
9	6.90	9.49	10.66	1.12
10	8.40	15.32	17.72	1.16
11	26.10	328.96	348.86	1.06
12	5.70	7.85	9.00	1.15
13	22.20	257.41	265.91	1.03
14	24.90	306.23	346.26	1.13
15	41.30	1229.38	1364.12	1.11
16	42.50	1030.77	1093.20	1.06
17	44.80	1098.20	1218.31	1.11
18	38.60	851.30	1008.80	1.18
19	36.00	776.66	894.11	1.15
20	43.30	945.12	1128.96	1.19

Especie: _____ # de árbol: _____

BC 1

Fecha: _____

BOLETA PARA DATOS DE CAMPO
(Estudio de biomasa)

Finca: _____ Relieve: _____

Pendiente: _____ % Suelo: _____

1. MEDIDAS TOTALES DEL ÁRBOL:

DAP _____ cm Altura copa: _____ m Altura: _____ m Longitud: _____ m

2. DATOS DE FUSTE (Fu):

No. secc.	m	Ø (cm)	Vol. (m ³)	Peso (g)	no. muestra	Peso con bolsa	Peso bolsa	Peso humedo
To								
1	2							
2	4							
3	6							
4	8							
5	10							
6	12							
7	14							
8	16							
9	18							
10	20							
11	22							
12	24							
13	26							
14	28							
15	30							
TOTAL								

3. MUESTRAS DE HOJAS (Ho):

No. muestr	Peso con bolsa	Peso bolsa	Peso humedo

Peso total de Ho: _____ kg

4. MUESTRAS DE RAMAS (Ra):

No. muestr	Peso con bolsa	Peso bolsa	Peso humedo

Peso total de Ra: _____ kg

5. MUESTRAS DE RAMILLAS (RiI):

No. muestr	Peso con bolsa	Peso bolsa	Peso humedo

Peso total de RiI: _____ kg

CÁLCULOS PARA ÍNDICE DE EXPANSIÓN:

6. MUESTRAS DE ESTRÓBILOS (Es):

No. muestr	Peso con bolsa	Peso bolsa	Peso humedo

Peso total de Es: _____ kg



FACULTAD DE AGRONOMIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
AGRONOMICAS

LA TESIS TITULADA: "ESTIMACION DE BIOMASA Y CUANTIFICACION DE CARBONO PARA Pinus oocarpa Schiede, P. maximinoi H.E. Moore y P. caribaea Morelet. var hondurensis EN ALGUNOS BOSQUES NATURALES DE GUATEMALA".

DESARROLLADA POR LA ESTUDIANTE: ANA LORENA CORDOVA LOPEZ

CARNET: 9510123

HA SIDO EVALUADA POR LOS PROFESIONALES: Ing. Agr. Eddi Alejandro Vanegas Chacón
Ing. Agr. Eugenio Oliverio Orozco y Orozco
Ing. Agr. Josué Ivan Morales Dardón

Los Asesores y las Autoridades de la Facultad de Agronomía, hacen constar que ha cumplido con las Normas Universitarias y Reglamentos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Ing. Agr. Edwin Canales Cano Morales
ASESOR

Ing. Agr. Roderico A. Estrada May
ASESOR

Dr. Ariel Abderramán Ortiz López
DIRECTOR DEL IIA

I M P R I M A S E

Ing. Agr. M. Sc. Edgar Oswaldo Franco Rivera
D E C A N O

AOL/rm

c.c. Control Académico

IIA

Archivo

APARTADO POSTAL 1545 § 01091 GUATEMALA, C.A.

TEL/FAX (502) 476-9794

e-mail: llusac.edu.gt § <http://www.usac.edu.gt/facultades/agronomfa.htm>