



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIONEN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

ESTIMACIÓN DE VOLUMEN, BIOMASA Y CARBONO AÉREO EN TRES ESPECIES ARBÓREAS DE PLUMA HIDALGO, OAXACA

MARTÍN AQUINO RAMÍREZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

La presente tesis titulada: **“ESTIMACIÓN DE VOLUMEN, BIOMASA Y CARBONO AÉREO EN TRES ESPECIES ARBÓREAS DE PLUMA HIDALGO, OAXACA”**, realizada por el alumno: **MARTÍN AQUINO RAMÍREZ**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS FORESTALES**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



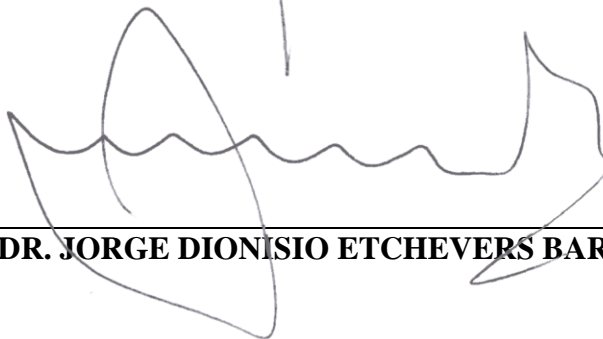
DR. ALEJANDRO VELÁZQUEZ MARTÍNEZ

ASESOR:



DR. JUAN FRANCISCO CASTELLANOS BOLAÑOS

ASESOR:



DR. JORGE DIONISIO ETCHEVERS BARRA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Mayo de 2014.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada para los estudios de maestría.

Al **Colegio de Postgraduados (COLPOS)** por la oportunidad de seguir estudiando en esta excelente institución académica.

Al **Dr. Alejandro Velázquez Martínez** por su amistad brindada y toda la confianza depositada en mí, así como el gran apoyo a la elaboración y dirección de esta investigación, además de su infinita paciencia mostrada conmigo.

Al **Dr. Juan Francisco Castellanos Bolaños** por su amistad, excelentes consejos, estímulo académico y brindarme la oportunidad de adentrarme a la investigación forestal en el estado de Oaxaca, así como el apoyo para la culminación exitosa de esta investigación.

Al **Dr. Héctor de los Santos Posadas** por su apoyo, enseñanzas y sugerencias para mejorar sustancialmente este trabajo de investigación.

Al **Dr. Jorge D. Etchevers Barra** por sus valiosas aportaciones a este trabajo y apoyo en la fase de laboratorio.

A la **M.C. Haidie Hervert Zamora** por sus comentarios, revisiones y sugerencias para enriquecer el escrito de esta investigación.

Al **Ing. Alberto Perez Mariscal** por la autorización y la oportunidad de desarrollar la presente investigación en la finca “La Cabaña” en Pluma Hidalgo, Oaxaca.

A la brigada en la fase de campo, **Sr. Rogelio, Sr. Cano, Sr. Agustín**, por las enseñanzas en el bosque tropical.

A mis amigos de Oax por su aliento a continuar estudiando: **Elizabeth, Maribel, Gaby, Xóchitl, Jesús, Rene**, sin olvidar a los amigos y compañeros del CP: **Lisette Hervert, Wenceslao Santiago, Rolando Tlaxcala, Esteban Blas, Luis Ángel Martínez, Magnolia Méndez, Berenice List y German Bautista**.

A los profesores del CP que influyeron en mi formación académica en esta aventura, Doctores, **Patricia Hernández, Armando Gómez, Antonio Trinidad, Juan Ignacio Valdez, Miguel A. López y Sergio Pérez**.

DEDICATORIA

“El simple hecho que no puedas ver algo, no significa que no existe”

Dedico esta tesis a mi familia, especialmente a mi madre **Margarita Ramírez López** por sus consejos, amor y confianza, y a mi padre **Martín Aquino Santiago** por enseñarme sentido de compromiso conmigo mismo, a los dos por su incondicional apoyo.

A mis hermanos: **Reyna alhelí** y **Ángel** por su cariño, confianza y el apoyo brindado durante mi formación profesional.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN GENERAL	x
SUMMARY	xi
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1.2 El ciclo de carbono en los ecosistemas forestales.....	3
1.1.3 Biomasa	5
1.1.3.1 Importancia de la Biomasa.....	5
1.1.3.2 Densidad de biomasa	7
1.1.3.3 Estimación de biomasa mediante el uso de ecuaciones alométricas.....	9
1.1.3.4 Aditividad en la estimación de biomasa de los componentes del árbol.....	11
1.1.4 Ecuaciones desarrolladas para estimación de biomasa en México	13
1.1.5 Características de las especie bajo estudio.....	17
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 General.....	19
1.2.2 Específicos	19
1.3 HIPÓTESIS.....	19
1.4 LITERATURA CITADA.....	20
CAPÍTULO II.....	24
SISTEMA DE PARTICIÓN DE BIOMASA AÉREA EN TRES ESPECIES ARBÓREAS TROPICALES EN OAXACA, MÉXICO.....	24
2.1 RESUMEN.....	24
2.2 INTRODUCCIÓN	25
2.3 MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.3.1 Área de estudio	26
2.3.2 Muestreo destructivo de árboles	27
2.3.3 Comparación de grupos de especies	28
2.3.4 Ajuste de modelos de regresión	29
2.3.5 Partición de biomasa individual del árbol.....	30
2.3.6 Ajuste de los modelos de regresión	31
2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31

2.4.1 Biomasa aérea y densidad específica.....	31
2.4.2 Grupos de especies.....	33
2.4.3 Modelos de biomasa	35
2.4.4 Partición de biomasa.....	38
2.5 CONCLUSIONES	42
2.6 AGRADECIMIENTOS	42
2.7 LITERATURA CITADA.....	42
CAPÍTULO III	47
VOLUMEN COMERCIAL Y VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE CARBONO EN TRES ESPECIES ARBÓREAS TROPICALES DE OAXACA, MÉXICO	47
3.1 RESUMEN.....	47
3.2 INTRODUCCIÓN	48
3.3 MATERIALES Y MÉTODOS	50
3.3.1 Área de estudio	50
3.3.2 Modelos de regresión para estimar el volumen comercial.....	50
3.3.3 Determinación de la concentración de carbono	52
3.3.4 Análisis estadístico de la concentración de carbono.....	53
3.3.5 Modelo para estimar la cantidad de carbono	55
3.3.6 Factores de expansión de biomasa y carbono	55
3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
3.4.1 Variaciones en la concentración de carbono.....	56
3.4.2 Estimación del volumen comercial.....	61
3.4.3 Estimación de carbono aéreo total	64
3.4.4 Estimación de biomasa y carbono a partir del volumen	65
3.5 CONCLUSIONES	70
3.6 LITERATURA CITADA.....	70
CAPITULO IV	73
4.1 CONCLUSIONES GENERALES	73
4.2 RECOMENDACIONES GENERALES.....	73

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Promedio de la biomasa viva y total de los principales ecosistemas terrestres del mundo. (Fuente: Houghton <i>et al.</i> , 2009).	7
Cuadro 1.2. Principales ecuaciones alométricas desarrolladas para la estimación de biomasa en los diferentes tipos de vegetación en México.	15
Cuadro 2.1 Modelos ajustados para estimación de biomasa total (Bt).	30
Cuadro 2.2 Principales parámetros dendrométricos, pesos secos y densidad específica de la madera de los árboles derribados.	32
Cuadro 2.3 Resultados de la prueba de adicionalidad para la agrupación de especies con el modelo: $Bt = [\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2] + [\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2] (Dn^2 H) + \varepsilon$	34
Cuadro 2.4 Comparativo y estadísticos de bondad de ajuste de los modelos para estimar la Bt	35
Cuadro 2.5 Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados para estimar la Bt	36
Cuadro 2.6 Resultados de ajuste para estimar la partición de biomasa del árbol en las tres especies arbóreas.	39
Cuadro 3.1 Factores y niveles para el análisis de varianza en la concentración de carbono (CC).	54
Cuadro 3.2. Concentración de carbono (CC, %) entre componentes estructurales del árbol y concentración de carbono promedio ponderado (CCPP, %) en las tres especies tropicales.	59
Cuadro 3.3. Principales parámetros dendrométricos y volumen de fuste comercial de los árboles derribados.	62
Cuadro 3.4. Resultados de la prueba de adicionalidad para la agrupación de especies con el modelo: $Vol = [\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2] + [\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2] (Dn^2 Hk) + \varepsilon$	62
Cuadro 3.5. Resultados de ajuste de los modelos con variables indicadoras para estimar volumen comercial.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Distribución de la <i>Bt</i> por componentes estructurales (hojas, ramas, corteza, fuste, tocón) en las diferentes categorías diamétricas de los árboles muestreados.	32
Figura 2.2 Densidad específica de la madera (g cm^{-3}) en las tres especies arbóreas. Valores con diferente letra son significativamente diferentes (Tukey's HSD; $p \leq 0.0001$).	33
Figura 2.3 Biomasa total (<i>Bt</i>) en función al Dn^2H en las tres especies arbóreas.	35
Figura 2.4 Ajuste de las ecuaciones para la estimación de <i>Bt</i> en los dos grupos de especies tropicales.	37
Figura 2.5 Error relativo en la estimación de la <i>Bt</i> en los diferentes diámetros del árbol.	37
Figura 2.6 Modelos ajustados para estimar biomasa en los componentes estructurales del árbol: a) tocón, b) fuste, c) corteza, d) ramas y e) hojas.	40
Figura 2.7 Distribución de biomasa entre componentes estructurales del árbol.	41
Figura 3.1 Localización del área de estudio.	50
Figura 3.2. Comparación intra-específica de la concentración de carbono (CC) considerando la categoría diamétrica y el componente estructural para a) <i>C. dentata</i> , b) <i>A. latifolia</i> y c) <i>I. punctata</i> . Medias ($n=3$) con letras distintas son diferentes ($p \leq 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de Tukey's HSD. ..	57
Figura 3.3. Comparación intra-específica de la concentración de carbono (CC) en las tres especies tropicales. Medias ($n=9$) con letras distintas son diferentes ($p \leq 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de Tukey's HSD.	58
Figura 3.4. Error relativo ignorando la variación inter-específica e intra-específica en la concentración de C en las especies tropicales, considerando que el 50% de C corresponde a la biomasa seca.	61
Figura 3.5. Modelo ajustado para estimar volumen de fuste comercial (m^3) para los dos grupos de especies.	64
Figura 3.6. Resultados de ajuste de los modelos para estimar el contenido de carbono aéreo (<i>Ct</i>).	64

Figura 3.7. Modelo ajustado para estimar el carbono aéreo total (Ct) en los dos grupos de especies.....	65
Figura 3.8. Estimación de la biomasa aérea total (Bt) a partir del volumen comercial (vol) en las tres especies arbóreas.	67
Figura 3.9. Estimación del carbono aéreo total (Ct) a partir del volumen comercial (vol) en las tres especies arbóreas.	67
Figura 3.10. FEB y FEC ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) variables para los diferentes tamaños del árbol en a) Grupo 1 y b) Grupo 2.	69

ESTIMACIÓN DE VOLUMEN, BIOMASA Y CARBONO AÉREO EN TRES ESPECIES ARBÓREAS DE PLUMA HIDALGO, OAXACA

Martín Aquino Ramírez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN GENERAL

Los reservorios y el potencial de almacenamiento de la cantidad biomasa y carbono se desconocen en la mayoría de los bosques tropicales de México, por lo que es importante realizar estimaciones precisas mediante el desarrollo de ecuaciones alométricas para conocer su variación espacial y temporal presente en los ecosistemas forestales. El presente estudio se realizó en el municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca, México, perteneciente a la región fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, con el objetivo de desarrollar ecuaciones para estimar volumen comercial, biomasa y carbono aéreo total en las especies *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd. Se aplicó un muestreo destructivo a 48 árboles de los que se obtuvieron muestras de los componentes estructurales aéreos, para la cuantificación de la biomasa y la medición de la concentración de carbono. Mediante una prueba de adicinalidad se agruparon las especies arbóreas utilizando para ello un modelo de regresión, resultando dos grupos. En los modelos ajustados para la estimación de volumen comercial, biomasa y carbono aéreo total las variables predictoras fueron el diámetro normal y la altura total del árbol, además, se incluyeron variables indicadoras para definir el efecto del grupo, los cuales presentaron altos valores en el coeficiente de determinación ajustado ($R_{Adj}^2 > 0.97$). Las diferencias en la cantidad de biomasa área total entre grupos fueron atribuidas a la densidad específica de la madera y a la morfología de los árboles. La biomasa en los componentes estructurales del árbol (tocón, fuste, corteza, ramas, hojas) fueron estimados como un sistema de ecuaciones a partir de factores de partición, utilizando regresión SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*) para estimar los parámetros de regresión; logrando una consistencia lógica entre las funciones de biomasa de los componentes debido a que se cumple la propiedad de *aditividad*. La concentración de carbono (CC) promedio inter-específica e intra-específica en las tres especies tropicales mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.0001$). Además, se desarrollaron ecuaciones para estimar factores de expansión de biomasa (FEB) y factores de expansión de carbono (FEC) variables, a partir de la razón de los modelos de biomasa aérea total y el volumen comercial con corteza del árbol para su aplicación a datos de inventarios forestales. La mayor acumulación de biomasa se concentra principalmente en ramas seguida del fuste, corteza, tocón y hojas, en las tres especies.

Palabras claves: *Árboles tropicales, análisis de regresión, variable indicadora, ecuaciones alométricas, concentración de carbono*

ABOVEGROUND VOLUME, BIOMASS AND CARBON ESTIMATION IN THREE TREE SPECIES IN PLUMA HIDALGO, OAXACA

Martín Aquino Ramírez, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2014

SUMMARY

Pools and storage potential of biomass and carbon are unknown in most tropical forests of Mexico, so it is important to make accurate estimates throughout the development of allometric equations in order to know both spatial and temporal variations in the forest ecosystems. This study was conducted in Pluma Hidalgo, Oaxaca, Mexico, in the physiographic region of the *Sierra Madre del Sur*, in order to develop equations to estimate commercial wood volume, above-ground biomass and total above-ground carbon in three tree species: *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw., and *Inga punctata* Willd. Samples of the structural aerial components were taken throughout destructive sampling on 48 trees for measurement of biomass and carbon concentrations. Two different groups were obtained throughout an additive test, where tree species were grouped by using a regression model. In the adjusted models for volume, above-ground biomass and above-ground total carbon, the independent variables were the DBH and total tree height; in addition, indicator variables were included to define the group effect, these models obtained high values of determination coefficient adjustment ($R_{Adj}^2 > 0.97$). Differences in the amount of above-ground total biomass among groups were attributed to wood specific density and tree morphology. Biomass of the tree structural components (stump, stem, bark, branches, and leaves) were estimated as an equation system throughout partitioning factors using SUR (Seemingly Unrelated Regressions) regression to estimate regression parameters; getting a logical consistency among the functions of the components of biomass, because additive property is obtained. Inter and intra specific average carbon concentration (CC), in the three species showed significant differences ($p \leq 0.0001$). In addition, equations were developed to estimate both biomass expansion factors (BEF) and carbon expansion factors (FEC) variables, throughout the ratio of the models of total aerial biomass and commercial volume with bark, in order to use in forest inventory. Greatest biomass accumulation of the three species is concentrated mainly in descendent order in the branches, stem, bark, stump, and leaves.

Keywords: Tropical trees, regression analysis, indicator variable, allometric equations, carbon concentration.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1.1 Cambio climático global

La variabilidad climática de nuestro planeta se ha convertido en la actualidad, en uno de los temas más preocupantes y estudiados con la finalidad de poder definir la raíz de la misma y sus fluctuaciones a través del tiempo. A pesar de que el clima en nuestro planeta es dinámico y cambiante por su ciclo natural, actualmente, parte de esa variación, es consecuencia de las actividades humanas; tales como, el aumento de las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) los cuales han provocado cambios importantes en las escalas climáticas de la tierra (Schimel *et al.*, 1995; IPCC, 2007); la emisión de CO₂ a la atmósfera, gas de efecto invernadero se ha intensificado por la quema de combustibles fósiles y el cambio del uso del suelo (Dixon *et al.*, 1994). Este continuo incremento en la concentración atmosférica de CO₂, hace prever que conducirán a cambios significativos en el clima (Houghton *et al.*, 1996; Friedlingstein *et al.*, 2001). Es probable que el cambio en la temperatura media global en superficie para el período 2016-2035, en relación con el período 1986-2005, esté en el rango de 0.3° C a 0.7°C, esta evaluación se basa en varias líneas de evidencia y en el supuesto de que no se producirán erupciones volcánicas importantes ni alteraciones persistentes en la irradiación solar total. Las proyecciones apuntan a que es probable que el aumento de la temperatura media global en superficie para 2081-2100, en relación con 1986-2005, se sitúe en los rangos derivados de las simulaciones determinadas por la concentración de la Fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados variara entre 2.1° C a 4.7 °C (IPCC, 2013).

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2012), define el cambio climático como el cambio atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. Las concentraciones atmosféricas de GEI como el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), han incrementado desde 1750 debido a actividades humanas. Por ejemplo, el dióxido de carbono, que es resultado de la quema de combustibles fósiles como el petróleo,

carbón y gas natural (utilizados para generar energía para mover a vehículos, electricidad para las industrias, hogares, etc.), de incendios, deforestación y actividades agrícolas; el metano y el óxido nitroso, resultado de múltiples actividades humanas (IPCC, 2001; Karl y Trenberth, 2003).

En el 2011, las concentraciones de estos GEI fueron de 391 ppm¹ de dióxido de carbono, 1803 ppb de metano y 324 ppb de óxido nitroso excediendo los niveles pre-industriales alrededor del 40%, 150% y 20 % respectivamente (IPCC, 2013). Aproximadamente la mitad de las emisiones actuales están siendo absorbidas por el océano y los ecosistemas terrestres pero esta absorción es sensible al clima y a las concentraciones de CO₂ en la atmósfera (Betts *et al.*, 1997; Cao and Woodward, 1998b; Cox *et al.*, 2000), el incremento atmosférico del CO₂ puede afectar la eficiencia de absorción por parte de estos y por consiguiente, al clima (Friedlingstein *et al.*, 2001).

Motivado por este rápido incremento del CO₂ atmosférico, a partir de la revolución industrial, se han venido realizando diversas investigaciones por científicos internacionales, analizado el papel de los componentes individuales del sistema de la tierra en el ciclo global del carbono (Falkowski *et al.*, 2000). Las emisiones anuales netas de CO₂ procedentes de la combustión de combustibles fósiles y la producción de cemento fueron de 8.3 (7.6-9.0) GtC² año⁻¹ promediadas entre 2002-2001 y de 9.5 (8.7-10.3) GtC año⁻¹ en 2011, un 54% por encima del nivel correspondiente a 1990. Las emisiones anuales netas de CO₂ antropogénicas por el cambio del uso del suelo fueron de 0.9 (0.1-1.7) GtC año⁻¹ en promedio durante 2001-2011 y de 1750 al 2011, las emisiones de CO₂ de la combustión de combustibles fósiles y producción de cemento se han disparado a 375 (345-405) GtC a la atmósfera, mientras la deforestación y el cambio del uso del suelo son estimados en 180 (100-260) GtC, resultando emisiones acumulativas antropogénicas de 555 (470-640) GtC. De esta acumulación antropogénica de emisiones de CO₂, 240 (230-250) GtC están acumuladas en la atmósfera, 155 (125-185) GtC han sido absorbida por el océano y 160 (70-250) GtC han sido acumulados en ecosistemas terrestres naturales (IPCC, 2013).

¹ ppm: partes por millón o ppb: partes por billón, es la proporción del número de moléculas de gas con respecto al número de moléculas de aire seco. Por ejemplo, 300 ppm corresponde en promedio 300 moléculas de gas por un millón de moléculas de aire seco.

²1 GtC: una gigatonelada de carbono, es igual a 10¹⁵ gramos de carbono. Esto corresponde a 3.667 GtCO₂.

Ante tal situación, se han realizado una serie de acuerdos internacionales entre los países para reducir sus emisiones de CO₂ o buscar sumideros para reducir las tasas de concentración en la atmósfera de este gas de GEI entre los principales se encuentra en primer lugar el protocolo de Kyoto en 1997 en el Marco de la Convención de las Naciones Unidas para el Cambio Climático. En él se da reconocimiento a la importancia de los ecosistemas terrestres en el ciclo global del carbono, donde se recomienda la protección, mejora y cuantificación de los sumideros de la biosfera terrestre por las emisiones de CO₂ antropogénicas (Cramer *et al.*, 2001).

1.1.2 El ciclo de carbono en los ecosistemas forestales

Los ecosistemas terrestres desempeñan un papel importante en el ciclo global del carbono, son un gran reservorio y regulador de las concentraciones de bióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Estos ecosistemas terrestres ejercen influencias sobre el clima mediante el intercambio de carbono, energía e intercambio de agua (IPCC, 2001), desempeñando un papel fundamental en la mitigación del cambio climático contribuyendo a la reducción de las emisiones de CO₂.

En los últimos 200 años las actividades humanas han alterado significativamente el ciclo de carbono (Falkowski *et al.*, 2000). La vegetación y el suelo presente en los ecosistemas terrestres desempeñan un papel importante en el ciclo del carbono y en las variaciones de CO₂ atmosférico (Cao y Woodward, 1998a; Cramer *et al.*, 2001), requiriendo una mejor comprensión y definición de la dinámica del balance de carbono a diferentes escalas, tanto para la interpretación de las variaciones observadas en el intercambio carbono entre la atmósfera-biosfera, como para la evaluación de las políticas para mitigar las emisiones antropogénicas de CO₂ (Fung *et al.*, 1997). Por lo anterior, es necesario realizar investigación respecto al potencial que se tienen de los sumideros (o fuentes) de los ecosistemas terrestres para CO₂ atmosférico requiriendo la cuantificación del intercambio neto de carbono entre la vegetación, suelo y la atmósfera (Cao y Woodward, 1998a). Debido a que los ecosistemas presentan heterogeneidad, se torna complejo, el obtener una alta precisión en la cuantificación del ciclo de carbono en los ecosistemas terrestres y la predicción de los impactos por el cambio climático global.

La fotosíntesis de las plantas, la respiración y la descomposición del carbono orgánico del suelo, están involucrados en el ciclo de carbono en los ecosistemas terrestres. Por lo tanto, la vegetación y el suelo poseen un papel importante en el ciclo global del carbono y las variaciones de CO₂ atmosférico. En consecuencia, los cambios en el tamaño de la vegetación y en los reservorios de carbono en el suelo, pueden afectar significativamente el CO₂ atmosférico (Cao y Woodward, 1998a).

Los bosques contribuyen potencialmente a mitigar el cambio climático global, gracias a su influencia sobre el ciclo global del carbono; almacenan grandes cantidades de éste en la vegetación y el suelo, lo intercambian con la atmósfera mediante la fotosíntesis y la respiración, son fuentes de carbono atmosférico cuando se perturba, se convierten en sumideros de carbono atmosférico durante el abandono y regeneración después de la perturbación y pueden ser ordenados para alterar su papel en el ciclo del carbono (Brown, 1997a). Los bosques del mundo almacenan una cantidad enorme de carbono superior a todo el carbono presente en la atmósfera (FAO, 2011), de acuerdo al Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007) estimaron que los ecosistemas forestales a nivel mundial es 638 Gt C, de los cuales 283 Gt C corresponde al biomasa vegetal, 38 Gt C corresponden a la madera muerta y 317 Gt C en el suelo hasta una profundidad de 30 cm y hojarasca, mientras que en la atmósfera con 750 Gt C.

Los bosques están sujetos a la acción de causas naturales y humanas, incluyendo aprovechamiento (abusivo o degradación), incendios forestales, aparición de plagas y enfermedades, así como la transformación para uso no forestal, especialmente agricultura y pastos. Estas perturbaciones motivan con frecuencia que los bosques se conviertan en fuentes de CO₂, debido a que la tasa de productividad primaria neta es sobrepasada por la respiración total u oxidación de las plantas, el suelo y la materia orgánica muerta (producción neta del ecosistema PNE < 0). Sin embargo, al mismo tiempo, cuando algunas áreas de bosques son aprovechados y degradados, o los terrenos agrícolas y pastizales son abandonados y vuelven de forma natural al bosque o se convierten en plantaciones, éstos se transforman en sumideros de C, es decir, la tasa de respiración de las plantas, el suelo y la

materia orgánica muerta es menor que la productividad primaria neta ($PNE > 0$) (Brown, 1997a).

La producción neta del ecosistema (PNE) es la cantidad de biomasa de autótrofos y heterótrofos producida en el ecosistema en un periodo dado, en la que se excluye las pérdidas por respiración, además incluye la mortalidad vegetal, animal y predación.

1.1.3 Biomasa

1.1.3.1 Importancia de la Biomasa

El conocimiento de la distribución espacial de la biomasa es importante para hacer cálculos de las fuentes y sumideros de carbono como resultado al convertir un bosque en un terreno sin cubierta vegetal (o viceversa). Además, los valores promedios de biomasa son usados en la mayoría de los cálculos de flujos de carbono. Otra razón importante de conocer la distribución espacial de biomasa, es que permite la medición de estos cambios a través del tiempo (Houghton, 2005).

El estudio de la biomasa es importante por muchas razones, entre ellas, constituye la materia prima de los alimentos, fibras y combustible, así mismo, es preponderante para el manejo de agua, suelo y fuego. Además, la biomasa está relacionada con la estructura de la vegetación, ya que su cambio influye en la biodiversidad, y está determinada por la magnitud y tasa de la respiración autotrófica (Houghton *et al.*, 2009). La biomasa no está definida consistentemente, se define normalmente como la masa de plantas y animales vivos, por ejemplo árboles, arbustos, pastos, hierbas y microbios, aunque algunas veces esta incluye el detritus, los componentes subterráneos (raíces, rizomas y microbios del suelo) pueden ser incluidas como un total con el material aéreo, aunque generalmente es la materia orgánica del suelo, que consiste en las partes de plantas en descomposición más allá de su identificación, y estas no son incluidas. La biomasa es una unidad de medida de la productividad de un ecosistema, del potencial energético y de la función de los bosques en el ciclo del carbono (FAO, 2012).

Los ecosistemas terrestres cuentan casi exclusivamente con la energía del sol (Kimmins ,1997) para realizar sus funciones fisiológicas como el crecimiento y el metabolismo de sus organismos residentes(no así muchas plantaciones comerciales que son fertilizadas; estos son energía que se agrega al sistema).Las plantas son relativamente poderosos factores de biomasa gracias a la luz solar que reciben, abasteciendo de tal forma a organismos superiores de cadenas de alimentación con energía y bloques estructurales de construcción de vida (Gough, 2012).Las plantas son los productores primarios terrestres, constituyéndose en los organismos que manufacturan mediante la fotosíntesis, moléculas nuevas orgánicas como los carbohidratos y lípidos para formar materiales orgánicos naturales. Estos nuevos bloques de compuestos orgánicos proveen energía que generalmente es accesible para los organismos heterótrofos, mismos que consumen las tasas de moléculas orgánicas producidas. De esta forma, los productores primarios son un vehículo esencial para trasferir la energía del sol a los consumidores incluyendo a los humanos, con combustible para conducir su metabolismo mientras proveen compuestos esenciales que contienen carbono que forman los bloques de células vivas (Gough, 2012). La biomasa de plantas y la materia orgánica del suelo contiene cerca de 2200 Gt de carbono a una profundidad de 2 m, dos veces más que la cantidad que se encuentra en la atmósfera, los flujos de carbono entre el sistema de vegetación-suelo y la atmósfera son 10 veces más grande que las emisiones de CO₂ de combustibles fósiles (Schimel *et al.*, 1995).

La biomasa como peso seco representa alrededor del 50% de carbono en el ciclo de carbono, la biomasa de plantas leñosas se centra principalmente en los bosques ya que estos sostienen alrededor del 70-90% de la biomasa aérea y subterránea terrestre (Cairns *et al.*, 1997). La cantidad de biomasa en los ecosistemas terrestres del mundo varían desde 385 a 650 Pg³C (Houghton *et al.*, 2009) (Cuadro 1.1).

³ 1 Pg: un pentagramo, es igual a 10¹⁵g o 1 Gt.

Cuadro 1.1. Promedio de la biomasa viva y total de los principales ecosistemas terrestres del mundo. (Fuente: Houghton *et al.*, 2009).

Tipo de ecosistema	Área (10 ⁶ ha)	Total de biomasa (Pg)	Promedio de la densidad de biomasa (Mg·ha ⁻¹)
Bosques tropicales	1750, 1850	680, 350	390, 190
Bosques templados	1040	280	270
Bosques boreales	1370	110	83
Bosques templados+bosques boreales	2410, 2450	390, 185	160, 75
Tundra ártica	560	4	7
Terrenos con arbustos mediterráneos	280	34	120
Terrenos de cultivo	1350	8	6
Sabanas y pastizales tropicales	2760	160	57
Pastizales tropicales	1500	12	8
Desierto	2770	20	7
Hielo	1550	0	0
Total	14930, 15070	1300, 733	87,51

La materia orgánica del suelo, de manera global, sostiene de dos a tres veces más carbono que la biomasa, sin embargo, mucho del carbono en el suelo esta físicamente y químicamente protegido y no es fácilmente oxidado. En contraste, la biomasa particularmente la aérea, es vulnerable al fuego, tala, cambio del uso del suelo, tormentas, plagas etc. y por tal razón este carbono es fácilmente desprendido a la atmósfera (Davidson y Janssens, 2006).

1.1.3.2 Densidad de biomasa

La biomasa aérea presente en un ecosistema determina el potencial de almacenamiento de carbono, mismo que desempeña un papel importante en la regulación del CO₂ atmosférico y el cambio climático global (Houghton *et al.*, 2000; Schimel *et al.*, 2001). Para la evaluación de la biomasa aérea de los bosques, es necesario en primera instancia, cuantificar la densidad de biomasa, la cual esta expresada como el peso seco por unidad de área (Brown, 1997b). La densidad de biomasa (cantidad de biomasa por unidad de área, o peso seco Mg por ha⁻¹) determina la cantidad de carbono emitido a la atmósfera (como CO₂, CO, y CH₄ a través de la quema y descomposición), cuando los ecosistemas son afectados (Houghton *et al.*, 2009), además, la biomasa es una variable utilizada para

comparar atributos estructurales y funcionales de un ecosistema forestal, a través de un amplio rango de condiciones ambientales (Brown, 1997b).

La medición de la densidad de biomasa se realiza a través de la toma de una muestra en una serie de sitios, ésta es una labor muy intensa y extenuante, ya que es una técnica destructiva. Dicha técnica involucra el derribo de todos los árboles que se encuentran dentro del sitio o parcela de estudio, después se procede a secar el material que se recolecta a un peso constante (quitar la mayor parte de la humedad) y volverlos a pesar (Brown, 1997b). Cuando se toma en cuenta la biomasa subterránea (biomasa debajo del suelo) se complican las mediciones, dada la variedad y matriz de raíces en el suelo, lo mismo sucede cuando se realiza la medición de la biomasa aérea, en el caso de que se quiera medir árboles de grandes dimensiones. Es importante definir de manera adecuada el tamaño de los sitios o parcelas de muestreo, ya que sitios pequeños pueden sobrestimar o subestimar la densidad promedio de biomasa si se extrapolan a árboles muy grandes.

La precisión en las estimaciones de biomasa en un bosque tropical, utilizando una muestra representativa (muestreo destructivo), no es muy práctico y mucho menos en cuestión de tiempo y costos; además es casi imposible o poco realizable, cuando se requiere monitorear y volver a remuestrear (medir esos mismos sitios), para evaluar los cambios (Houghton *et al.*, 2009). La densidad de biomasa varía en tiempo y espacio, sino también, entre la diversidad de los ecosistemas. Esta variabilidad es resultado en parte, de la limitación de los recursos del ambiente (nutrientes en el suelo, precipitación y temperatura), y sobre todo en las variaciones como resultado de los disturbios y los procesos de recuperación. Por ejemplo, en un incendio forestal la biomasa aérea, puede ser cercano a cero, pero incrementa cuando se recupera el bosque.

Se puede considerar a la acumulación de biomasa como indefinido, debido al remplazo de los rodales después de un disturbio en el bosque por el remplazo de los bosques viejos por los nuevos. Por otra parte, los bosques están en su mayoría en proceso de recuperación natural o de forma inducida después de un disturbio, de esta forma los bosques acumulan carbono con tasas bajas similares a los bosques viejos (Houghton *et al.*, 2009). Por ejemplo, a nivel de un rodal del bosque (0.1-1 km), donde el área es relativamente homogénea en edad y composición de especies, la densidad de biomasa varía a través del tiempo como

resultado de los disturbios y su recuperación. Por otro lado, a escala del paisaje (1-100 km) conformado por diferentes rodales, la densidad de la biomasa varía a través del espacio consecuencia de las diferencias en las edades (Houghton *et al.*, 2009). Por lo anterior, se han desarrollado métodos indirectos para estimar la densidad de biomasa. En donde, la técnica empírica más común se basa en ecuaciones alométricas, las cuales se desarrollan a partir de la toma de muestras destructivas, que permite la estimación de la densidad de biomasa de manera más fácil, con el uso de variables dasométricas, tales como el diámetro normal y la altura total del árbol (Brown, 1997b).

1.1.3.3 Estimación de biomasa mediante el uso de ecuaciones alométricas

La aplicación de ecuaciones alométricas es de gran utilidad ya que permite la estimación de biomasa individual de un árbol, o de la totalidad de un rodal, mediante el uso de variables dasométricas fáciles de medir en el campo, cuando la estimación se trata de un gran número de árboles. Para generar las ecuaciones alométricas es necesario el derribo, el peso total y de cada uno de los componentes de una muestra de árboles, que presenten un amplio número de categorías diamétricas posibles y posteriormente ajustar un modelo matemático con la información obtenida.

Es de suma importancia la definición y aplicación de una adecuada ecuación de biomasa (EB) que permita predecir la biomasa del árbol como una función del diámetro normal (Dn) a 1.30 m sobre el nivel del suelo o de manera conjunta con otra variable dasométrica del árbol como la altura total (H). De manera práctica para inventarios forestales la EB puede expresarse de la siguiente manera (Somogyi *et al.*, 2007):

$$B = f(P_1, P_2, \dots, p_1, p_2, \dots)$$

donde B es la biomasa (masa fresca o seca de la planta en kg o Mg), P_1, P_2 , los datos disponibles del árbol (Dn en cm; altura en m, etc.) y p_1, p_2 , el o los parámetro(s) de la ecuación. En la estimación de la biomasa se requiere de la especificación de los componentes incluidos del árbol, normalmente se consideran los siguientes: raíces (gruesas o delgadas, hasta un determinado diámetro, pero excluyendo a las raíces finas; tocón, fuste comercial (hasta un diámetro mínimo), fuste no comercial que es la parte delegada que se

encuentra arriba del fuste comercial, corteza, ramas gruesas y delgadas, así como el follaje (Somogyi *et al.*, 2007).

El modelo matemático más comúnmente utilizado para EB toma la forma de una función potencial (Kaitaniemi, 2004; Pilli *et al.*, 2006; Somogyi *et al.*, 2007; Navar, 2009) expresado de la siguiente forma: $B = \beta_0 x^{\beta_1}$ donde β_0 y β_1 es el coeficiente de escala y el exponente de escala respectivamente. Es posible expresar esta misma función de forma lineal simple mediante la aplicación de logaritmos (Espinosa-Bancalari y Perry, 1987; Helgerson *et al.*, 1988; Brown *et al.*, 1989) es decir: $\log B = \beta_0 + x\beta_1$ donde β_0 y β_1 son los parámetros de la ecuación, B es la biomasa total o de algún componente del árbol, x es la variable independiente, por ejemplo el Dn (Zianis, 2008) y \log es el logaritmo natural o logaritmo a base 10. Al mismo tiempo, se han desarrollado modelos de regresión de biomasa en donde se incluye en una sola ecuación información del Dn, H y (ρ) la gravedad específica de la madera en (g cm^{-3}), un ejemplo de dichos modelos son los desarrollados por Chave *et al.* (2005), para los diferentes tipos de bosques tropicales del Neotropico y del Sureste de Asia u Oceanía.

$$\ln(B) = \alpha + \beta_1 \ln(Dn) + \beta_2 \ln(H) + \beta_3 \ln(\rho)$$

$$\ln(B) = \alpha + \beta_2 \ln(Dn^2 H \rho)$$

$$\ln(B) = \alpha + \ln(Dn^2 H \rho)$$

$$\ln(B) = a + b \ln(Dn) + c (\ln(Dn))^2 + d (\ln(Dn))^3 + \beta_3 \ln(\rho).$$

donde $\alpha, \beta_1, \beta_2, \beta_3, a, b, c, d$ son los parámetros de la ecuación y \ln logaritmo natural. Las ecuaciones de predicción de biomasa desarrolladas generalmente utilizan una de las siguientes tres formas (Parresol, 1999):

Lineal (error aditivo)	$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_j x_j + \varepsilon$
------------------------	---

No lineal (error aditivo)	$y = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_j^{\beta_j} + \varepsilon$
---------------------------	---

No lineal (error multiplicativo)	$y = \beta_0 x_1^{\beta_1} x_2^{\beta_2} \dots x_j^{\beta_j} \varepsilon$
----------------------------------	---

donde y es la biomasa total o de algún componente del árbol, x_j una variable del árbol, β_j parámetro del modelo y ε término del error. Las principales variables utilizadas comúnmente del árbol como se mencionó anteriormente, son el Dn , Dn^2 , H , Dn^2H , Dn^2Hp además, de la edad y longitud de la copa viva (LCL). El modelo 1) corresponde a un modelo de regresión lineal múltiple que puede ser ajustado por el procedimiento de estimación de mínimos cuadrados ordinarios; el modelo 2) ecuaciones de regresión no lineal necesita de procedimientos interactivos para la estimación de los parámetros, mientras que para el modelo 3) las ecuaciones de regresión no lineal normalmente son transformadas a ecuaciones de regresión lineal (error aditivo) mediante el uso de logaritmos en ambos lados de la ecuación. De esta forma los parámetros de la ecuación pueden fácilmente ser estimadas por el procedimiento de mínimos cuadrados ordinarios (Parresol, 1999).

1.1.3.4 Aditividad en la estimación de biomasa de los componentes del árbol

De acuerdo con Bi *et al.* (2004) cuando se desarrollan ecuaciones para los componentes de biomasa del árbol frecuentemente estos son estimados por separado sin tomar en cuenta dos situaciones: 1) la correlación inherente entre los componentes de la biomasa medidos en la misma muestra de árboles y 2) la restricción lógica entre la suma de las predicciones de los componentes del árbol y la predicción total del árbol.

Cuando se realiza la estimación de la biomasa de un árbol es deseable que la suma de las predicciones de las ecuaciones de regresión de los componentes (raíces, tocón, fuste, corteza, ramas, hojas) sea igual a la predicción total del árbol. A este método se le llama *aditividad* en un sistema de ecuaciones con el que se logra una consistencia lógica para las funciones de biomasa de los componentes del árbol.

Para eliminar esta inconsistencia, se han sugerido diversas especificaciones de modelos y métodos de estimación para forzar la *aditividad* en un sistema de ecuaciones de biomasa, tanto para modelos lineales y no lineales (Parresol, 1999; Parresol, 2001; Bi *et al.*, 2004). Parresol (1999), realizó una revisión sobre los procedimientos para forzar la *aditividad* en un sistema de ecuaciones lineales de biomasa, clasificando en tres los procedimientos de acuerdo a la forma en que los componentes individuales son agregados.

El primer procedimiento implica el mejor ajuste de las funciones de regresión para cada componente de manera independiente, así la función de regresión para la biomasa total es igual a la suma de cada una de las funciones de regresión individuales de los k componentes, el sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 &= f_1(x'_1) \\ \hat{y}_2 &= f_2(x'_2) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \hat{y}_k &= f_k(x'_k) \\ \hat{y}_{total} &= \hat{y}_1 + \hat{y}_2 + \dots + \hat{y}_k\end{aligned}$$

En este sistema de ecuaciones la varianza para la ecuación de biomasa total es estimado por:

$$Var(\hat{y}_{total}) = \sum_{i=1}^k var(\hat{y}_i) + 2 \sum_{i < j} \sum cov(\hat{y}_i, \hat{y}_j)$$

Donde la covarianza $Cov(\hat{y}_i, \hat{y}_j) = \hat{\rho}_{\hat{y}_i, \hat{y}_j} \sqrt{var(\hat{y}_i)var(\hat{y}_j)}$

$$\hat{\rho}_{\hat{y}_i, \hat{y}_j} = \text{correlacion estimada entre } \hat{y}_i \text{ and } \hat{y}_j$$

En el segundo procedimiento se utiliza la misma variable independiente en cada una de las ecuaciones para cada componente. Para calcular los coeficientes de regresión en la ecuación de biomasa total, sólo se suman los coeficientes de regresión de las ecuaciones de cada componente (asumiendo independencia) y con ello se garantiza la adicionalidad. En cada ecuación i se tiene un vector b_i de parámetros, entonces el sistema está definido por:

$$\begin{aligned}\hat{y}_1 &= x' b_1 \\ \hat{y}_2 &= x' b_2 \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \hat{y}_k &= x' b_k \\ \hat{y}_{total} &= x' [b_1 + b_2 + \dots + b_k]\end{aligned}$$

Bajo el supuesto de independencia de los componentes, la varianza de \hat{y}_{total} es la suma de las varianzas de las \hat{y}_i 's.

$$var(\hat{y}_{total}) = \sum_{i=1}^k var(\hat{y}_i)$$

El tercer procedimiento descrito por Parresol (1999) asegura la *aditividad* de las ecuaciones de biomasa forzando los coeficientes de regresión de cada componente para estimar la biomasa total; esta aditividad se logra mediante el ajuste de contrastes de los coeficientes de regresión. La regresión lineal generalizada (*SUR* por sus siglas en inglés *Seemingly unrelated regression*) puede ser utilizada si se asumen correlaciones contemporáneas entre ecuaciones de componentes para la estimación de los parámetros y con ello se logra obtener una varianza baja. La estructura de un sistema de ecuaciones de modelos de biomasa ajustado por *SUR* está definido por:

$$\begin{aligned} y_1 &= f_1(x_1, \beta_1) + \varepsilon_1 \\ y_2 &= f_2(x_2, \beta_2) + \varepsilon_2 \\ &\vdots \\ y_k &= f_k(x_k, \beta_k) + \varepsilon_k \\ y_{total} &= f_{total}(x_1, x_2, \dots, x_k, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k) + \varepsilon_{total} \end{aligned}$$

donde para cada ecuación se tiene un vector de componentes de biomasa y_i , una matriz que contiene las variables independientes x_i , β_i un vector de parámetros y un vector de error aleatorio ε_i .

1.1.4 Ecuaciones desarrolladas para estimación de biomasa en México

A pesar de la importancia de la cuantificación de la biomasa en los ecosistemas forestales del país, aún son pocas las investigaciones que se han realizado para desarrollar ecuaciones alométricas (Cuadro 2). El diámetro normal y la altura total, así como la densidad específica de la madera son las variables predictoras en las ecuaciones desarrolladas, por ser fáciles de medir en campo, al mismo tiempo el ajuste de modelos potenciales y polinomiales son los más utilizados para estimar la cantidad de biomasa aérea total y de los componentes estructurales del árbol en especies tropicales y templadas. El

ajuste en la mayoría de las ecuaciones desarrolladas recurre al uso de logaritmos (natural o base 10) para transformar el modelo potencial a un lineal (Cuadro 2), logrando con ello reducir la heterocedasticidad, así mismo, en otros trabajos utilizan algoritmos de optimización lineal para resolver el problema de mínimos cuadrados para modelos no lineales. Para mejorar la precisión en las estimaciones de la cantidad de biomasa es indispensable el desarrollo de nuevas ecuaciones a nivel de especie o grupos de especies donde se tome en cuenta la variabilidad de las condiciones ambientales y estructurales por el sitio, además de la localización geográfica. De la misma manera, es importante tomar en cuenta las variaciones inter-específicas e intra-específicas en las concentraciones de carbono en las especies arbóreas para desarrollar modelos para estimar la cantidad de carbono en el arbolado.

Cuadro 1.2. Principales ecuaciones alométricas desarrolladas para la estimación de biomasa en los diferentes tipos de vegetación en México.

Autor	Especies	Tipo de vegetación	Dn (cm)	N	Ecuación
Méndez-González <i>et al.</i> ,2011	<i>Pinus devoniana</i> Lindl., <i>P. pseudostrabus</i> Lindl.	Plantación mixta en Guanajuato	13-27	40	$B=Exp(-1.705+1.936 \ln(Dn))$ $B=Exp(1.250+0.157Dn)$
Acosta-Mireles <i>et al.</i> ,2011	<i>Clethra mexicana</i> DC., <i>Alnus arguta</i> (Schltdl) Spach.	Bosque mesófilo de montaña	10-40	37	$B=0.4632Dn^{1.8168}$ $B=0.1649 Dn^{2.2755}$
Avendaño-Hernández <i>et al.</i> ,2009	<i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schl. et Cham.	Bosque de Abies	6.5-79	26	$B=0.0713 Dn^{2.5104}$
Cairns <i>et al.</i> ,2003	<i>Brosimum alicastrum</i> Sw., <i>Manilkara zapota</i> (L.) Royen, <i>Luehea speciosa</i> Wildl., <i>Pouteria unilocularis</i> (Donn. Sm.) Baehni, <i>Trichilia minutiflora</i> Standl., <i>Spondias mombin</i> Linn.	Selva subperinifolia seca	>10-82.1	195	$B=Exp\{-2.173+0.868 \ln(Dn^2 H)+0.0939/2\}$
Acosta-Mireles <i>et al.</i> ,2002	<i>Clethra hartwegii</i> Britt., <i>Rapanea myricoides</i> (Schl.) Lundell., <i>Alnus glabrata</i> Fernald., <i>Liquidambar macrophylla</i> Oerst., <i>Inga sp.</i> , <i>Quercus peduncularis</i> Née.	Bosque mesófilo de montaña y bosque de encino	3.3-25	52	$\ln(B)=-2.194+2.364 \ln(Dn)$ $\ln(B)=-2.193+2.412 \ln(Dn)$ $\ln(B)=-1.969+2.189 \ln(Dn)$
Návar,2009	<i>Lysiloma divaricata</i> (Jacq) Macbr., <i>Haematoxylon brasiletto</i> Karst., <i>Cochlospermum vitifolium</i> (Wild.), <i>Ceiba acuminata</i> (S. Watson) Rose., <i>Bursera penicillata</i> (B. inopinata), <i>Jatropha angustifolia</i> Mull. Arg., <i>Quercus spp.</i> , <i>Pinus herrerae</i> Martinez., <i>Pinus oocarpa</i> Schiede ex Schlectendal, <i>Pinus engelmannii</i> Carriere, <i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.) Franco., <i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schlectendal et Chamisso, <i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schlectendal et Chamisso, <i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltdl., <i>Pinus cooperi</i> Blanco,	Bosque tropical seco y Bosque templado	5.2-57.4	872	$B=0.3700(Dn)^{1.9600}$ $B=0.1354(Dn)^{2.3033}$ $B=0.1229(Dn)^{2.3964}$

	<i>Pinus durangensis</i> Martinez, <i>Pinus arizonica</i> Engelmann.					
Rojo-Martínez <i>et al.</i> ,2005	<i>Hevea brasiliensis</i> Müll. Arg.	Plantación de hule en Papaloapan, Oaxaca	10-40	28		$\ln(B) = -3.1426 + 2.69273 \ln(Dn)$
Figueroa-Navarro <i>et al.</i> ,2010	<i>Pinus patula</i> Schltl. et Cham.	Bosque templado de <i>Pinus patula</i>	2.6-56.9	18		$B = 5.338 + 0.018635(Dn^2 H)$
Martínez-Yrizar <i>et al.</i> ,1993	<i>Caesalpinia eriostachys</i> Benth., <i>Thouinia paucidentata</i> Radlk., <i>Apoplanesia paniculata</i> Presl., <i>Lonchocarpus constrictus</i> Pitt., <i>Caesalpinia coriaria</i> (Jacq.) Willd., <i>Ipomea Wolcottiana</i> Rose., <i>Lonchocarpus lanceolatus</i> Benth., <i>Opuntia excelsa</i> Sanchez-Mejorada., <i>Lysiloma microphylla</i> Benth., <i>Heliocarpus pallidus</i> Rose., <i>Bursera excelsa</i> (HBK) Engl., <i>Caesalpinia sclerocarpa</i> Standl., <i>Cordia elaeagnoides</i> DC., <i>Jatropha malacophylla</i> Standl., <i>Guettarda elliptica</i> Sw.	Selva baja caducifolia	> 3	191		$\log(B) = -0.5352 + 0.9996 \log(BA)$ $\log(B) = -0.4492 + 0.9972 \log(BA) + 0.7127 \log(WSG)$ $\log(B) = -0.7590 + 0.9011 \log(BA) + 0.5715 \log(WSG) + 0.5654 \log(H)$
Díaz-Franco <i>et al.</i> ,2007	<i>Pinus patula</i> Schl. et Cham	Bosque templado de <i>Pinus patula</i>	6.7-64.1	25		$B = 0.0357 Dn^{2.6916}$
Pimienta De la Torre <i>et al.</i> ,2007	<i>Pinus cooperi</i> Blanco	Bosque templado de pinos	>7.5- <67.5	633		$B = 22.3476 - 4.9470 (Dn) + 0.4911(Dn^2) + 0.0039(Dn^2 H)$ $\ln(B) = -1.62 + 2.12 \ln(Dn)$ $\ln(B) = -3.51 + 2.67 \ln(Dbase)$ $\ln(B) = -4.04 + 4.00 \ln(Dn) - 0.29 (\ln(Dn))^2$ $\ln(B) = -4.60 + 2.93(Dbase) + 0.45(\ln(Dbase))^2 - 0.12(\ln(Dbase))^3$
Douterlungne <i>et al.</i> ,2013	<i>Guazuma ulmifolia</i> , <i>Trichospermum mexicanum</i> , <i>Inga vera</i> , <i>Ochroma pyramidale</i>	Bosque neotropical	0-39.8	103		$\ln(B) = -2.45 + 2.30 \ln(Dn)$ $\ln(B) = -4.56 + 2.82 \ln(Dbase) + 0.29 (\ln(Dbase))^2 - 0.09 (\ln(Dbase))^3$ $\ln(B) = -2.82 + 2.42 \ln(Dn)$ $\ln(B) = -3.75 + 2.65 \ln(Dbase) - 0.01 (\ln(Dbase))^3$

N: número de observaciones; *B*: biomasa total; *Dn*: diámetro normal; *WSG*: densidad básica de la madera; *Dbase*: diámetro de la base; *ln*=logaritmo natural; *log*: logaritmo base 10.

1.1.5 Características de las especie bajo estudio

a) *Cupania dentata* DC.

Se distribuye de forma natural en la vertiente del Golfo de México desde el sur de Tamaulipas, el sureste de San Luis Potosí y el norte de Puebla y Veracruz hasta Tabasco, el norte de Chiapas y en la depresión central, sur de Campeche y Quintana Roo; en la vertiente del Pacífico desde de Sinaloa a Chiapas. Se encuentra del nivel del mar hasta 500 o 600, en vegetación secundaria y también en parte del estrato medio o superior de las selvas altas o medianas perennifolias, subperennifolias y subcaducifolias, en suelos derivados de material calizo o de origen ígneo y metamórfico. Es un árbol de 20 m de altura y un diámetro normal de 50 cm, tronco derecho, acanalado, a veces con pequeños contrafuertes, ramas ascendentes, compa irregular, densa. La corteza es lisa a ligeramente fisurada, con un grosor total de corteza de 5 a 15 mm. Ramas jóvenes acanaladas, con 3-4 costillas conspicuas, pardo verdosas a verde grisáceas, finamente pubescentes. Hojas dispuestas en espiral, pinnadas de 16 a 45 cm de largo incluyendo el pecíolo, folíolos alternos o a veces opuestos. Las hojas presentan margen ampliamente aserrado o crenado o casi entero, ápice redondeado, verde oscuro a verde amarillento y brillantes y glabros con la nervadura principal pubescente en el haz. Es una especie dioica, florece durante todo el año. Los frutos son cápsulas *ca.*1.5 cm de largo incluyendo el estípite, trivalvadas, agudamente trilobadas, cortamente estipitadas, verde oscuro, 1 semilla por lóculo. La madera es utilizada para la construcción de casas y otras obras rurales, así como para fabricar mangos de herramientas agrícolas (Pennington y Sarukhán, 2005).

b) *Alchornea latifolia* Swartz(1788)

Se distribuye en la vertiente del Golfo de México en Tamaulipas, Puebla, San Luis Potosí, Veracruz, Tabasco y Quintana Roo. En la vertiente del Pacífico, se le encuentra en Jalisco, Oaxaca y Chiapas. Altitud: 0 a 1,600 m pero preferentemente alrededor de los 400 a 800 m. A menudo abundante a lo largo de pendientes abruptas de barrancas y cañadas. Prospera en acahuals, relictos de selva media, claros de bosque, cafetales y a lo largo de caminos. Crece en suelos derivados de material calizo o ígneo y metamórfico, pero siempre en suelos

con buen drenaje y buena capacidad de retención de humedad. Suelos: negro, rendzina con caliza, café-oscuro pedregoso, oscuro arcilloso. Es árbol perennifolio, de 8 a 25 m (hasta 30 m) de altura, con un diámetro normal de hasta 60 cm. Copa redonda o irregular. Hojas simples, alternas, grandes, elípticas; láminas de 7 a 18 cm de largo por 9 a 28 cm de ancho, ovadas a orbiculares, margen crenado; verde oscuras en el haz y verde pálidas en el envés con nerviación amarillenta prominente. Especie dioica. Los frutos son cápsulas biloculares de hasta 1.3 cm de ancho, perianto, estilo y estigmas persistentes. Semillas 2 de 6 mm de diámetro, ligeramente comprimidas, maduran de marzo a mayo. Su madera relativamente suave se utiliza en construcción rurales ligeras, se emplea mucho como sombra de plantaciones de café en la zona de Pluma Hidalgo, Oaxaca (Pennington y Sarukhán, 2005).

c) *Inga punctata* Willd.

Árbol de 4 a 10 (15) m de altura; ramitas glabras, estrigosas o ferrugíneo-puberulentas y muy lenticeladas; estípulas hasta 8 mm de largo, decíduas. Hojas con 2-3 (4) pares de folíolos, elípticos a lanceolados, ápice obtuso, agudo o acuminado, glabros, seríceo-grisáceos, el par distal de 6-17 por (1.7-) 3-7 cm, par basal de 3-11 por 1-5 cm; raquis cilíndrico, glándulas interfoliolares sésiles y urceoladas; pecíolo cilíndrico. Una de las principales especies de *Inga* más usadas como sombra para plantaciones de cafeto, se desarrolla en selvas medianas perennifolias o subperennifolias (Pennington y Sarukhán, 2005).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General

Estimar el volumen comercial, la biomasa aérea y el contenido de carbono en *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd., especies arbóreas nativas del bosque tropical de Pluma Hidalgo, Oaxaca.

1.2.2 Específicos

- Desarrollar modelos para estimar la cantidad de biomasa aérea total y un sistema de partición de biomasa del árbol para las tres especies, empleando como variables dasométricas explicativas al diámetro normal y la altura total.
- Medir y comparar la concentración de carbono entre especies así como también en los componentes estructurales (fuste, ramas y hojas) del árbol.
- Ajustar modelos para estimar volumen comercial y carbono aéreo total.
- Desarrollar factores de expansión de biomasa y factores de expansión de carbono variables a nivel de árbol para su aplicación a datos de inventarios forestales.

1.3 HIPÓTESIS

- El volumen comercial, la biomasa aérea total y el carbono aéreo total en las tres especies tropicales pueden ser modelados cada uno de ellos, bajo un mismo modelo mediante el uso de variables indicadoras y con ello obtener modelos más prácticos y precisos.
- Las diferencias en la cantidad de biomasa y carbono de las tres especies son influidas por la densidad de madera presente.
- La concentración de carbono varía en función del componente estructural del árbol (fuste, ramas, corteza) y a la especie arbórea.

1.4 LITERATURA CITADA

- Betts, R. A., P. M. Cox, S. E. Lee and F. I. Woodward. 1997. Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations. *Nature* 387:796-799.
- Bi, H., J. Turner and M. J. Lambert. 2004. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. *Trees* 18:467-479.
- Brown, S. 1997a. Los bosques y el cambio climático: el papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. In *Actas del XI Congreso Mundial Forestal: Recursos Forestales y Arboles* pp. 13-22.
- Brown, S. 1997b. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, pp. 55.
- Brown, S., A. J. R. Gillespie and A. E. Lugo. 1989. Forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 35(4):881-902.
- Cairns, M. A., S. Brown, E. H. Helmer, and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests, *Oecologia*, 111:1-11.
- Cao, M. and F. I. Woodward. 1998b. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 393:249-252.
- Cao, M. And F. I. Woodward. 1998 a. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 4:185-198.
- Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.P. Lescure, B. W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra and T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145:87-99.
- Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall and L. J. Totterdell. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408:184-187.
- Cramer, W., A. Bondeau, F.I. Woodward, I. C. Prentice, R. A. Betts, V. Brovkin, P. M. Cox, V. Fisher, J. A. Foley, A. D. Friend, C. Kucharik, M. R. Lomas, N. Ramankutty, S. Sitch, B. Smith, A. White and C. Young-Molling. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 7(4): 357-373.
- Davidson, E. A., and I. A. Janssens. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440:165-173.

- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science (Washington)*, 263(5144):185-1991.
- Espinosa-Bancalari, M. A. and D. A. Perry. 1987. Distribution and increment of biomass in adjacent young Douglas-fir stands with different early growth rates. *Can. J. For. Res.* 17:722-730.
- Falkowski, P., R. J. Scholes, E. Boyle, J. Canadell, D. Canfield, J. Elser, N. Gruber, K. Hibbard, P. Högberg, S. Linder, F. T. Mackenzie, B. Moore III, T. Pedersen, Y. Rosenthal, S. Seitzinger, V. Smetacek, W. Steffen. 2000. The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System. *Science* 290(5490):291-296.
- FAO. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales. FAO, Roma, pp.44.
- FAO. 2011. Situación de los bosques en el mundo. 2011. Estudio FAO Montes 163. Roma (Italia). Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s.pdf>.
- FAO. 2012. FRA 2015 Términos y Definiciones FAO, Roma, pp.10.
- Friedlingstein, P., L. Bopp, P. Ciais, J.L. Dufresne, L. Fairhead, H. LeTreut, P. Monfray and J. Orr. 2001. *Geophysical Research Letters*, 28(8):1543-1546.
- Fung I., C. B. Field, J. A. Berry, M. V. Thompson, J. T. Randerson, J. T. Randerson, C. M. Malmström, P. M. Vitousek, G. James Collatz, P. J. Sellers, D. A. Randall, A. S. Denning, F. Badeck and J. John. 1997. Carbon 13 exchanges between the atmosphere and biosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, 11: 507-533.
- Gough C. M. 2012. Terrestrial Primary Production: Fuel for Life. *Nature Education Knowledge*, 3(10):28.
- Helgerson, O. T., K. Cromack, S. Stafford, R. E. Miller and R. Slagle. 1988. Equations for estimating aboveground components of young Douglas-fir and red alder in a coastal Oregon plantation. *Can. J. For. Res.* 18:1082-1085.
- Houghton, J. T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.). 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Vol. 2. Cambridge University Press,
- Houghton, R.A. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology* 11: 945-958.
- Houghton, R.A., F. Hall., and S. J. Goetz. 2009. Importance of biomass in the global carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G2):1-13.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, Cambridge, 892 pp.

- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). 2007. Resumen Técnico. *In* Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK y NY.
- IPCC, 2012: Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 555-564
- IPCC. 2007. Fourth assessment report, climate change 2007. Synthesis report: summary for policymakers. Ginebra (Suiza). IPCC (disponible también en www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_spm.pdf).
- Kaitaniemi, P., 2004. Testing allometric scaling laws. *J. Theor. Biol.* 228:149-153.
- Karl, T. R and K. E. Trenberth. 2003. Modern Global Climate Change. *Science*,302:1719-1723.
- Kattenberg, A., F. Giorgi, H. Grassl, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, T. Tokioka, A. J. Weaver, and T. M. L. Wigley. 1996. Climate Change 95: The Science of Climate Change, chapter 6. Climate Models - Projections of Future Climate, pp. 285–357, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, England.
- Kimmins, J.P.1997.Balancing Act. Environmental issues in forestry. 2nd ed., UBC Press, Vancouver, Canada.Pp.33-97.
- Navar, N. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *For. Ecol. Manage.* 257:427-434.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparison. *For Sci.* 45:573-593.
- Parresol, B. R.2001.Additivity of nonlinear biomass equations. *Can. J. For. Res.*31:865-878.

- Pennington, T. D., y J. Sarukhán. 2005. Árboles de México. Manual para la identificación de las principales especies. *Universidad Nacional Autónoma de México. Fondo de Cultura Económica. México.* 523 pp.
- Pilli, R., T. Anfodillo and M. Carrer. 2006. Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass. *For. Ecol. Manage.* 237:583-593.
- Schimel, D., I. G. Enting, M. Heimann, T. M. L. Wigley, D. Rayneud, D. Alves, and U. Siegenthaler. 1995. CO₂ and the carbon cycle. In: J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris, and K. Maskell (eds.), *Climate change 1994 radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCCIS92 emission scenarios*, published for the IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 35-71.
- Shimel, D., I. G. Enting, M. Heimann, T. M. L. Wigley, D. Raynaud, D. Alves and U. Siegenthaler. 1995. CO₂ and the carbon cycle. In: *Climate Change 1994* (Intergovernmental Panel on Climate Change), pp. 35-72. University of Cambridge Press, Cambridge.
- Somogyi, Z., E. Cienciala, R. Mäkipää, P. Muukkonen, A. Lehtonen, P. Weiss. 2007. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *Eur. J. Forest. Res.* 126:197-207.
- Zianis, D. 2008. Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *For. Ecol. Manage.* 256:1400-1407.

CAPÍTULO II

SISTEMA DE PARTICIÓN DE BIOMASA AÉREA EN TRES ESPECIES ARBÓREAS TROPICALES EN OAXACA, MÉXICO

2.1 RESUMEN

El desarrollo de ecuaciones alométricas es una herramienta importante para conocer la variación espacial y temporal de la cantidad de biomasa presente en los ecosistemas forestales. El presente estudio se realizó en el municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca, México, perteneciente a la región fisiográfica de la Sierra Madre del Sur, con el objetivo de desarrollar ecuaciones para estimar la biomasa aérea total y de los componentes estructurales del árbol, en las especies *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd. Mediante una prueba de adicionalidad se agruparon las especies arbóreas utilizando para ello un modelo de regresión, resultando dos grupos. En los modelos ajustados para la estimación de la biomasa aérea total las variables predictoras fueron el diámetro normal y la altura total del árbol, además, se incluyeron variables indicadoras para definir el efecto del grupo. El ajuste de dichos modelos se realizó por medio de regresión lineal y no lineal, mostrando diferencias en la cantidad de biomasa aérea total entre grupos, misma que fue atribuida a la densidad específica de la madera y a la morfología de los árboles. La biomasa en los componentes estructurales del árbol (tocón, fuste, corteza, ramas, y hojas) se estimó como un sistema de ecuaciones a partir de factores de partición utilizando regresión SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*) para ajustar los parámetros de la regresión. El análisis de los resultados mostró que la mayor acumulación de biomasa se concentra principalmente en las ramas, seguidas del fuste, la corteza, el tocón y las hojas, en las tres especies analizadas.

Palabras clave: Árboles tropicales, componentes estructurales, variable indicadora, ecuaciones alométricas.

2.2 INTRODUCCIÓN

En la mayoría de los bosques neotropicales de México se desconocen los reservorios y el potencial de almacenamiento de biomasa, por lo cual es indispensable realizar estimaciones lo más exactas y precisas posibles para entender la función de dichos bosques en el ciclo global de carbono. La estimación de la biomasa y de su integración en los componentes estructurales del árbol, es particularmente importante en los estudios de productividad, ciclo de nutrientes, flujos de energía, almacenes y captura de carbono, disturbios naturales y antropógenicos (Parresol, 1999, Bi *et al.*, 2004; Navar, 2009); así mismo, en el monitoreo de la salud del bosque y el manejo forestal sustentable (Castellanos *et al.*, 1996; Brandeis *et al.*, 2006; Navar-Cháidez, 2010).

Gran parte de la incertidumbre en las estimaciones de la cantidad y la variación espacial de la biomasa en los bosques se debe primordialmente a la falta de ecuaciones alométricas (Djomo *et al.*, 2010). Por lo tanto, el desarrollo de ecuaciones específicas para especies o grupos de especies para condiciones locales o del sitio (Cairns *et al.*, 2003; Basuki *et al.*, 2009; Navar-Cháidez, 2010), es muy importante para mejorar la precisión en la estimación no destructiva de la biomasa en la vegetación arbórea (Henry *et al.*, 2010, Kuyah *et al.*, 2012). Las relaciones alométricas frecuentemente incorporan variables dasométricas, por ejemplo, el diámetro normal y la altura total del árbol como variables predictoras (Chave *et al.*, 2005; Djomo *et al.*, 2010; Rutishauser *et al.*, 2013), porque presentan una correlación alta con la biomasa y por ser fáciles de medir directamente en campo.

Los trabajos realizados para generar ecuaciones de las especies nativas del trópico mexicano son escasos, aun cuando, muchas de estas especies, son utilizadas para programas de plantaciones forestales comerciales y de restauración, así como para establecerse en los sistemas agroforestales. Algunos estudios relevantes para generar ecuaciones alométricas en la estimación de biomasa, son los realizados en el bosque tropical seco en la costa de Jalisco (Martinez-Yrizar *et al.*, 1992), la península de Yucatán (Cairns *et al.*, 2003) y en Sinaloa (Navar, 2009); mientras que en el bosque tropical húmedo son los desarrollados en Oaxaca (Acosta-Mireles *et al.*, 2002) y en Chiapas (Douterlungne *et al.*, 2013); así como en plantaciones comerciales de hule (Rojo-Martínez *et al.*, 2005; Monroy y Navar, 2004), donde ajustaron distintos modelos lineales y no lineales, incluyendo como variables

predictoras al diámetro normal, altura total, diámetro de la base, área basal y gravedad específica de la madera.

Los objetivos de este estudio fueron: 1) desarrollar modelos alométricos para estimar la cantidad de biomasa aérea total en *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd., especies arbóreas nativas de la Sierra Sur de Oaxaca, de manera conjunta mediante el uso de variables indicadoras y, 2) desarrollar un sistema de identificación de la distribución de la biomasa en los distintos componentes del árbol.

2.3 MATERIALES Y MÉTODOS

2.3.1 Área de estudio

El estudio se realizó en el predio de la finca La Cabaña, ubicada en el municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca, tiene una superficie de 300 ha aproximadamente, entre 15° 56' 13.54 N, 96°24'09.13 O y 15° 55' 12.85 N, 96°23 51.83 O, con una altitud de 700-1200 m. El clima corresponde a Semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano (ACm), con temperatura de 18-26 °C y precipitación de 1500- 3500 mm (INEGI, 2005). La zona se localiza en la región fisiográfica de la Sierra Sur de Oaxaca con una geomorfología de Sierra baja compleja, las rocas son metamórfica gneis del Jurásico, con un tipo de suelo Phaeozem (INEGI, 2009). En la zona de estudio se encuentran las siguientes especies arbóreas: *Alchornea latifolia* Sw., *Inga punctata* Willd., *Cupania dentata* DC., *Ficus* sp., *Clethra* sp., *Inga paterno* Harms, *Pterocarpus acapulcensis* Rose, *Homalium trichostemon* S.F. Blake, *Saurauia serrata* DC, *Cecropia obtusifolia* Bertol., *Diphysa robinoides* Benth., *Lonchocarpus guatemalensis* Benth., *Abutilon purpusii* Standl., *Calycophyllum candidissimum* (Vahl) DC., *Cupania glabra* Sw. y *Bursera simaruba*, las cuales presentan mayor abundancia relativa en la vegetación natural e Índice de Valor de Importancia (Anexo 2.1). Para este estudio se seleccionaron las tres primeras especies para desarrollar ecuaciones alométricas.

2.3.2 Muestreo destructivo de árboles

Para el estudio se derribaron 48 árboles, de los cuales 17 fueron *Cupania dentata*, 17 *Alchornea latifolia* y 14 *Inga punctata*. La metodología utilizada para estimar la biomasa aérea fue similar a la propuesta por Hitchcock y McDonnell (1979), donde los árboles se cortaron a ras de suelo separándolos en cinco componentes estructurales: tocón, fuste, corteza de fuste, ramas y hojas. Antes del derribo se midió el diámetro normal (D_n) con cinta diamétrica a una altura de 1.30 m sobre el nivel del suelo, y a esta altura se tomó una muestra de madera con un taladro Pressler de 5 mm de diámetro para determinar la densidad específica de la madera (ρ). Después del derribo se midió la altura total del árbol (H) con cinta métrica.

El fuste fue seccionado en trozas de 1 m de longitud para obtener el peso verde; así mismo, cada componente del árbol se pesó *in situ* por separado para obtener su peso verde con una báscula digital marca TECNOCOR modelo IPEN de 100 kg, con una precisión de ± 0.5 kg. El peso seco de cada componente fue obtenido mediante la relación peso seco: peso fresco, para lo cual se obtuvieron submuestras de madera consistentes en secciones transversales (rodajas) de fuste de aproximadamente 4-6 cm de grosor.

Las primeras dos rodajas fueron obtenidas a una altura de 0.30 y 1.30 m sobre el nivel suelo y después, en la parte superior de cada troza, separando la corteza de cada una de ellas; así mismo, se obtuvieron 4 muestras para las ramas y 4 muestras de 0.5 kg para las hojas. Todas las submuestras se pesaron inmediatamente para evitar pérdidas de humedad, se colocaron en bolsas de papel con sus respectivas etiquetas, se transportaron y se pusieron 96 h en una estufa de secado de madera (Nyle modelo L500) a 70 °C o hasta lograr un peso constante. El peso verde y el peso seco de las submuestras pequeñas se obtuvieron en una báscula electrónica (TECNOCOR modelo COR-30) con una precisión de ± 5 g. La relación peso seco: peso fresco promedio se utilizó para obtener la biomasa (peso seco) en el tocón, las ramas y las hojas, mientras que para el fuste y la corteza dicha relación se obtuvo de cada una de las submuestras de las trozas.

La biomasa total aérea (Bt) de cada árbol (kg) corresponde a la suma de la biomasa de cada uno de sus componentes, expresado así:

$$Bt = B_{\text{tocón}} + B_{\text{fuste}} + B_{\text{corteza}} + B_{\text{ramas}} + B_{\text{hojas}}$$

La densidad específica de la madera (ρ) fue obtenida por la relación del peso seco con el volumen verde de la muestra de madera (g cm^{-3}), mientras que el volumen verde se determinó por el método de desplazamiento de agua, previamente saturadas las secciones para evitar su contracción. El peso anhidro se obtuvo colocando las muestras en una estufa de secado por 48 h o hasta a alcanzar un peso constante.

2.3.3 Comparación de grupos de especies

La biomasa total de las tres especies se analizó de manera conjunta para conocer la posibilidad de agruparlas como una sola especie o grupos de especies, y poder definir en una sola ecuación la contribución relativa de las mismas, para ello se desarrolló una prueba de adicinalidad simple por medio de un análisis de regresión lineal incorporando variables indicadoras (variables dummy) (Draper y Smith, 1981; Montgomery y Peck, 1982).

$$Bt = \alpha_0 + \beta_1(Dn^2H) + \varepsilon$$

Al cual se le incorporó el factor especie como una variable indicadora de la siguiente forma:

$$Bt = [\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2] + [\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2] (Dn^2H) + \varepsilon$$

$$Z_1 = \begin{cases} 1, & \text{si pertenece a } Alchornea \text{ latifolia} \\ 0, & \text{de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_2 = \begin{cases} 1, & \text{si pertenece a } I. \text{ punctata} \\ 0, & \text{de otra forma} \end{cases}$$

donde Bt es la biomasa área total del árbol (kg), Dn es el diámetro normal (cm), H es la altura total (m), Z_1 y Z_2 corresponde a las variables indicadoras, α_0 , β_0 son los parámetros de regresión, α_1, α_2 , β_1 , β_2 los parámetros de regresión debidos a la adicinalidad y ε el error

aleatorio. Se consideró a *Cupania dentata* como la especie base en el modelo por presentar el mayor número de observaciones. Para agrupar a las especies como un solo grupo o grupos de especies, se consideró la homogeneidad de interceptos y de pendientes ($H_0=\alpha_1=\alpha_2=\beta_1=\beta_2=0$).

2.3.4 Ajuste de modelos de regresión

Una vez agrupadas las especies se ajustaron los modelos alométricos mediante procedimientos de regresión. Tres modelos utilizados en la estimación de la biomasa aérea total (Brown *et al.*, 1989; Parresol, 1999, 2001) fueron seleccionados, los cuales expresan la *Bt* como una función del diámetro normal y la altura del árbol:

$$Bt = f(Dn, H) + \varepsilon$$

En el Cuadro 2.1 se presentan los tres modelos los cuales incluyen a las variables indicadoras que definen el efecto del grupo de especies. Con la finalidad de comparar estos modelos y seleccionar el mejor, se consideró el coeficiente de determinación ajustado (R_{Adj}^2) que expresa la variabilidad explicada por el modelo tomando en cuenta el número de parámetros, la raíz de los cuadrados medios del error (RMSE) que define la precisión de las estimaciones, el coeficiente de variación en % (CV) el cual explica la variabilidad relativa en relación con la respuesta media, así como el error relativo promedio % (\bar{E}) y el sesgo promedio (\bar{S}) que permiten evaluar *a posteriori* el comportamiento del modelo (Chave *et al.*, 2005; Basuki *et al.*, 2009). Los cuales se calcularon de la siguiente forma:

$$R_{Adj}^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \hat{b}_i)^2 / (n - p)}{\sum_{i=1}^n (b_i - \bar{b}_i)^2 / (n - 1)} \right]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{b}_i - b_i)^2 / (n - p)}$$

$$CV(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \hat{b}_i)^2}{(n-p)}}}{\bar{b}} \cdot 100$$

$$\bar{E}(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{b}_i - b_i}{b_i}$$

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i - \hat{b}_i)}{n}$$

donde b_i, \hat{b}_i y \bar{b}_i es la biomasa total del árbol observado, predicho y medio respectivamente; n es el número de observaciones y p es el número de parámetros del modelo.

Cuadro 2.1 Modelos ajustados para estimación de biomasa total (Bt).

Modelo	Ecuación
1	$Bt = [\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2] + [\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2] (Dn^2 H) + \varepsilon$
2	$Bt = Exp^{[\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2]} (Dn^2 H)^{[\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2]} + \varepsilon$
3	$Bt = Exp^{[\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2]} Dn^{[\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2]} H^{\beta_3} + \varepsilon$

Bt : Biomasa área total del árbol (kg); Dn : diámetro normal (cm); H altura total (m); $\alpha_0, \beta_0, \beta_3$ parámetros de regresión de *C. dentata*; α_1, β_1 parámetros de adicionalidad debido a *A. latifolia*; α_2, β_2 parámetros de adicionalidad debido a *I. punctata*; Z_1, Z_2 variables indicadoras; Exp base de los logaritmos neperianos y ε el error aleatorio.

2.3.5 Partición de biomasa individual del árbol

La distribución de biomasa en los componentes estructurales del árbol, se ajustó como una función directa de la Bt y un factor de partición (F) expresado como:

$$B_{componente} = f_{componente}(Bt, F) + \varepsilon$$

El cual permitió derivar el siguiente sistema de ecuaciones de partición, con las siguientes funciones:

$$B_{tocón} = g(Bt, \delta) + \varepsilon$$

$$B_{fuste} = h(Bt, \theta) + \varepsilon$$

$$B_{corteza} = i(Bt, \varphi) + \varepsilon$$

$$B_{ramas} = j(Bt, \phi) + \varepsilon$$

$$B_{hojas} = k(Bt, \varpi) + \varepsilon$$

La propiedad de *aditividad* se cumple en el sistema de ecuaciones descrito anteriormente, ya que la suma de las predicciones de biomasa en cada componente estructural es igual a la predicción de la biomasa aérea total del árbol (Parresol, 1999, 2001; Carvalho y Parresol, 2003; Brandeis, *et al.*, 2006).

2.3.6 Ajuste de los modelos de regresión

Los parámetros de regresión en los modelos de partición de biomasa fueron estimados con el método SUR (*Seemingly Unrelated Regressions*), ya que se supone que existe una correlación entre las ecuaciones individuales de los componentes, para así lograr una varianza baja en el sistema y por lo tanto un mejor ajuste que aumente la sensibilidad de las pruebas de hipótesis. La *aditividad* en el sistema se garantizó con la definición de restricciones al modelo mediante el desarrollo de contrastes de los coeficientes de regresión (Parresol, 1999). El procedimiento MODEL de SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004) se usó para el ajuste de los modelos.

2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1 Biomasa aérea y densidad específica

El Dn de los árboles derribados se encontraron en un intervalo de 3.34 a 54.75 cm y una H de 6.9 a 27.2 m, así como una biomasa promedio por árbol de 260.22, 190.22 y 144.74 kg para *A. latifolia*, *C. dentata* e *I. punctata*, respectivamente (Cuadro 2.2). Las ramas es el componente estructural del árbol que presento un aumento considerable en la proporción de biomasa cuando se incrementa el Dn (Figura 2.1). Por otro lado, la densidad específica de la madera calculada en las tres especies arbóreas, presentó valores promedio de 0.30 ± 0.04 , 0.46 ± 0.04 y 0.48 ± 0.05 g cm⁻³ para *A. latifolia*, *C. dentata* e *I. punctata* respectivamente, considerando a la primera especie, de acuerdo con la clasificación de la densidad según la

tabla FITECMA (Sotomayor-Castellanos, 2008) como densidad baja (0.201-0.40 g cm⁻³); y las últimas dos especies, como densidad media (0.401-0.60 g cm⁻³).

Cuadro 2.2 Principales parámetros dendrométricos, pesos secos y densidad específica de la madera de los árboles derribados.

Especie	Promedio, Mínimo-Máximo			
	H [†] (m)	Dn [¶] (cm)	Peso seco del árbol (kg)	ρ [§] (g cm ⁻³)
<i>A. latifolia</i>	14.36(8.12-27.20)	20.64(5.92-54.75)	260.22(6.81-1550.96)	0.30(0.23-0.35)
<i>C. dentata</i>	13.99(6.90-20.15)	15.55(3.34-29.60)	190.22(2.12-593.84)	0.46(0.39-0.52)
<i>I. punctata</i>	14.52 (9.70-20.20)	14.28(4.71-27.82)	144.74(6.99-628.92)	0.48(0.41-0.55)

[†]H: altura total del árbol (m); [¶]Dn: diámetro normal (cm); [§] ρ densidad específica de la madera.

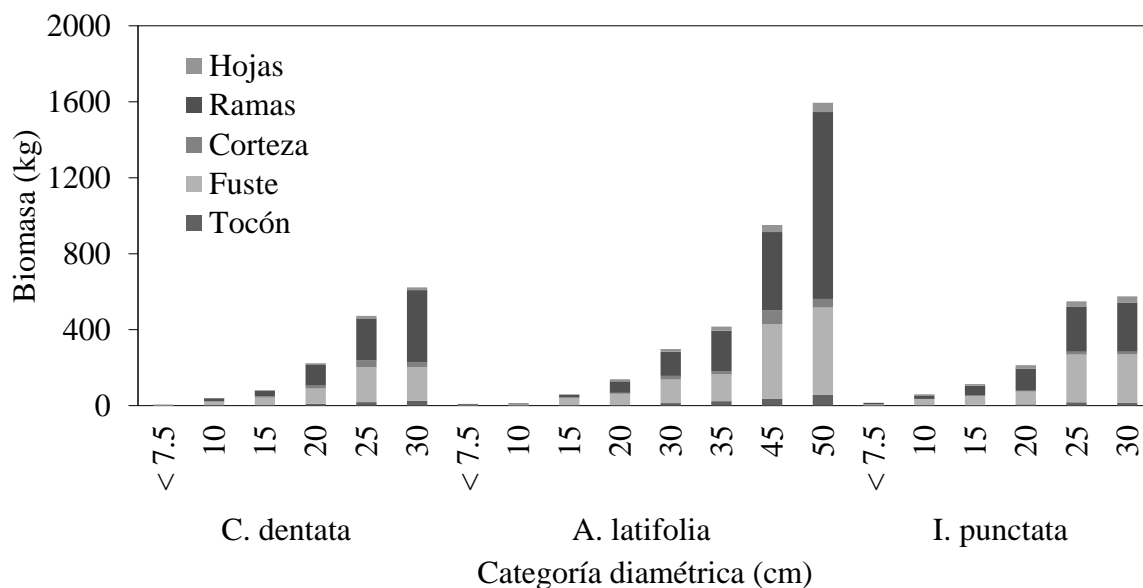


Figura 2.1 Distribución de la *Bt* por componentes estructurales (hojas, ramas, corteza, fuste, tocón) en las diferentes categorías diamétricas de los árboles muestreados.

Otros estudios han reportado valores similares de densidad específica de la madera de *A. latifolia* (Fuentes, 1998; Tamarit-Urias y Fuentes-Salinas, 2003) y para *C. dentata*

(Tamarit-Urias y López-Torres, 2007). Sin embargo, el valor promedio para *I. punctata* es inferior a $0.63 \pm 0.10 \text{ g cm}^{-3}$, valor reportado por Segura *et al.* (2006), diferencia que probablemente se deba a las prácticas de manejo implementadas en el sistema agroforestal de café con esta especie en esta zona, similares a las implementadas en San Ramón, Nicaragua (Segura *et al.*, 2006).

De acuerdo con el análisis de varianza hay diferencias estadísticas ($p \leq 0.0001$) en la densidad específica promedio de la madera de las especies. La prueba de comparación de medias de Tukey's HSD para clasificar las especies que presentan similitud, indica que no existe diferencia significativa ($p = 0.25$) en la densidad específica promedio de *C. dentata* e *I. punctata*, mientras que *A. latifolia* es estadísticamente diferente ($p \leq 0.0001$) a las anteriores (Figura 2.2).

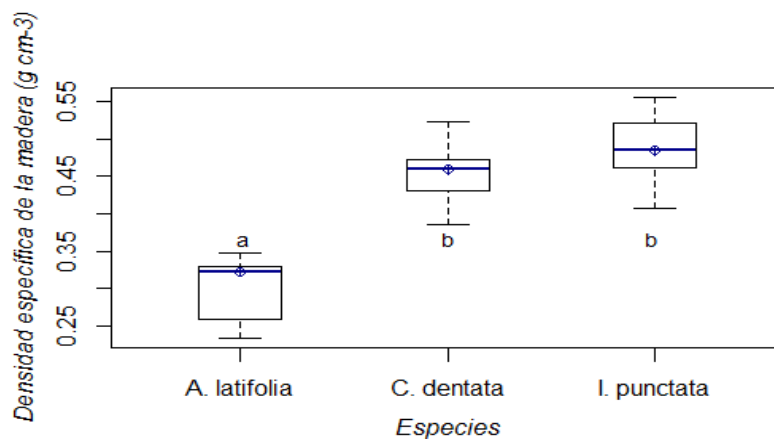


Figura 2.2 Densidad específica de la madera (g cm^{-3}) en las tres especies arbóreas. Valores con diferente letra son significativamente diferentes (Tukey's HSD; $p \leq 0.0001$).

2.4.2 Grupos de especies

Los resultados obtenidos en la prueba de adicinalidad (Cuadro 2.3), indican que las especies *C. dentata* e *I. punctata* pueden agruparse como una sola especie (Grupo 1), es decir, no existen diferencias significativas entre interceptos ($\alpha_0 = \alpha_1$, $p = 0.6578$), ni entre pendientes ($\beta_0 = \beta_1$, $p = 0.7239$), por lo que el efecto de la variable indicadora *Z* no es significativo. Por el contrario, en la misma prueba se encontró que estadísticamente hay diferencias entre la especie base *C. dentata* y *A. latifolia*, ya que la adicinalidad en los

parámetros de la pendiente es estadísticamente significativa ($\beta_0 \neq$, $p \leq .0001$), aunque no se presenten diferencias significativas entre interceptos ($\alpha_0 = \alpha_1$, $p = 0.3020$), por consiguiente, la especie *A. latifolia* conforma al Grupo 2. De la misma manera, los resultados obtenidos de la comparación de la densidad específica de la madera entre especies, indican esta misma tendencia de agrupamiento (Figura 2.2). El valor positivo y negativo de los parámetros de adicionalidad β_1 y β_2 (Cuadro 2.3), correspondiente al efecto de las especies, indican que hay mayor biomasa aérea por árbol en las especies de *C. dentata* e *I. punctata*, que para la especie de *A. latifolia*, cuando presentan el mismo diámetro y altura (Figura 2.3), estas diferencias son estadísticamente significativas. Por lo tanto, la cantidad de biomasa asociada a la densidad específica de la madera difiere entre grupos de especies, aun cuando los árboles se encuentran bajo las mismas condiciones (luz, temperatura, tipo de suelo, agua). Las especies del Grupo 1, forman parte del estrato inferior (12-20 m) de la estructura del bosque tropical de Pluma Hidalgo, mientras la especie del Grupo 2 se encuentra en el estrato de árboles altos (20-35 m) (Acosta, 1997).

Cuadro 2.3 Resultados de la prueba de adicionalidad para la agrupación de especies con el modelo: $Bt = [\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2] + [\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2](Dn^2 H) + \varepsilon$.

Especie	Parámetros estimados			
	Símbolo	Valor	Valor t	Pr > t
<i>C. dentata</i>	α_0	-14.7815	-1.15	0.2561
	β_0	0.0395	21.76	<0.0001
<i>A. latifolia</i>	α_1	17.3487	1.05	0.3020
	β_1	-0.0190	-10.15	<0.0001
<i>I. punctata</i>	α_2	8.0586	0.45	0.6578
	β_2	0.0009	0.36	0.7239

α_0, β_0 : Parámetros de regresión; α_1, β_1 parámetros de adicionalidad debido a *A. latifolia*; α_2, β_2 parámetros de adicionalidad debido a *I. punctata*.

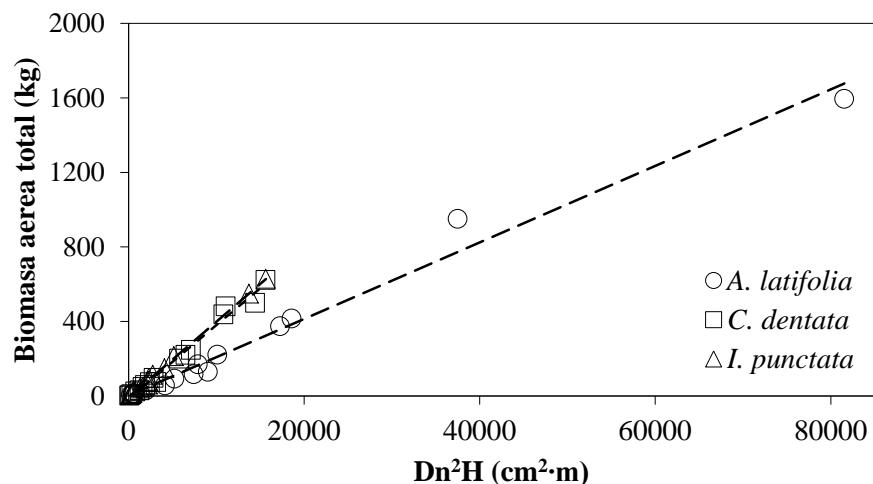


Figura 2.3 Biomasa total (Bt) en función al Dn²H en las tres especies arbóreas.

El uso de variables indicadoras en un modelo lineal, tiene la ventaja de que se pueden realizar de forma directa pruebas de hipótesis con el método de la suma extra de cuadrados (Montgomery, 2005), y con ello, comparar los parámetros de los modelos de estimación de biomasa debido al efecto de la especie.

2.4.3 Modelos de biomasa

Los modelos ajustados para la estimación de la *Bt* en los dos grupos (Cuadro 2.4), presentaron altos valores en el coeficiente de determinación ajustado ($R_{Adj}^2 > 0.98$). Por esta razón, la variación explicada por el modelo, cuando se incluye además del Dn, la H o una combinación (Dn²H) es alta; es decir, la precisión en la estimación de la biomasa mejora significativamente. Estos mismos resultados han sido obtenidos en otros trabajos para la estimación de biomasa en árboles tropicales (Brown *et al.* 1989; Brown, 1997; Araújo *et al.* 1999; Nogueira *et al.*, 2008; Feldpausch *et al.*, 2012).

Cuadro 2.4 Comparativo y estadísticos de bondad de ajuste de los modelos para estimar la *Bt*.

Modelo	RMSE [†] (kg)	CV [‡] (%)	\bar{S} [§] (%)	\bar{E} ^p (kg)	R_{Adj}^2 [¶]
1	36.61	18.69	-9.48	-0.20	0.9846
2	34.79	17.76	13.47	-5.11	0.9861
3	16.30	8.32	-4.76	0.90	0.9969

[†]RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; [¶] CV: coeficiente de variación; [§] \bar{S} sesgo promedio; ^p \bar{E} : error relativo estándar promedio; ^α R_{Adj}^2 coeficiente de determinación ajustado.

Los dos grupos de especies presentan diferencias estadísticas, por lo que los modelos generales (Cuadro 2.1), tienden a reducirse y, el efecto de la variable indicadora Z , es significativo (Cuadro 2.5). De acuerdo a los valores bajos de RMSE, CV, \bar{E} y mejor comportamiento, se seleccionó el Modelo 3 de la forma Schumacher y Hall (Figura 2.4), aun cuando el \bar{S} fue ligeramente mayor al del Modelo 1; así mismo se pueden considerar satisfactorios los estadísticos de ajuste de los Modelos 1 y 2. Todos los coeficientes de regresión en los modelos fueron altamente significativos, excepto α_0 del Modelo 1 (Cuadro 2.5).

Cuadro 2.5 Parámetros y estadísticos de los modelos ajustados para estimar la Bt .

Modelo	Parámetro	Estimador	EE [†]	Valor de t	Pr > t
1	α_0	-5.0170	6.7672	-0.74	0.4623
	β_0	0.0392	0.0012	32.36	<0.0001
	β_1	-0.0185	0.0011	-15.49	<0.0001
2	α_0	3.4189	0.2588	13.21	<0.0001
	β_0	1.0181	0.0277	36.77	<0.0001
	β_1	-0.0603	0.0050	-11.93	<0.0001
3	α_0	3.3630	0.1302	25.83	<0.0001
	β_0	2.4809	0.0459	54.09	<0.0001
	β_1	-0.2094	0.0078	-26.60	<0.0001
	β_2	0.4984	0.0365	13.67	<0.0001

[†]EE: error estándar de los parámetros.

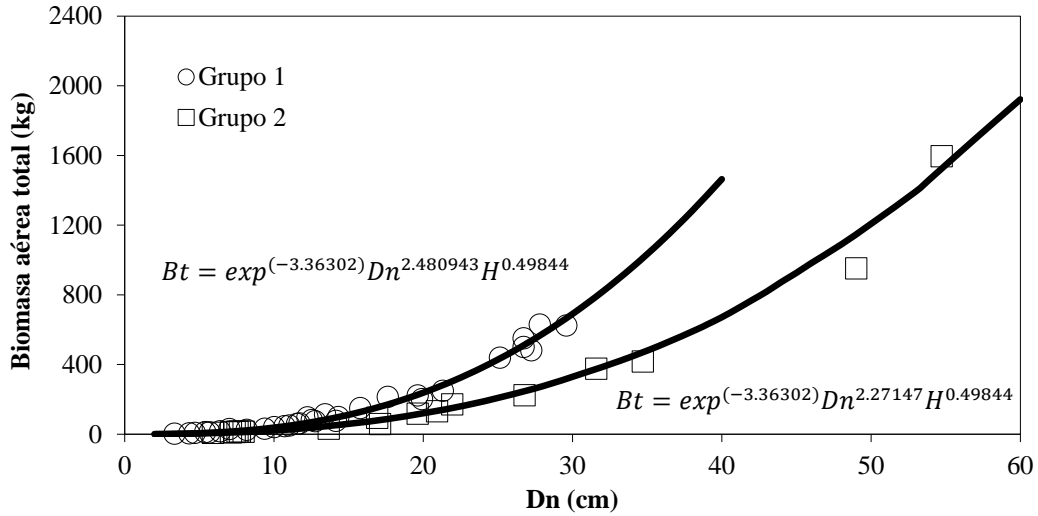


Figura 2.4 Ajuste de las ecuaciones para la estimación de Bt en los dos grupos de especies tropicales.

En los tres modelos, los valores de error relativo más altos corresponden a los árboles menores a 20 cm de diámetro (Figura 2.5), parte de esta variación en la biomasa puede deberse a que en estas categorías diamétricas los árboles crecen bajo una fuerte competencia por la luz con los árboles vecinos (Návar, 2009).

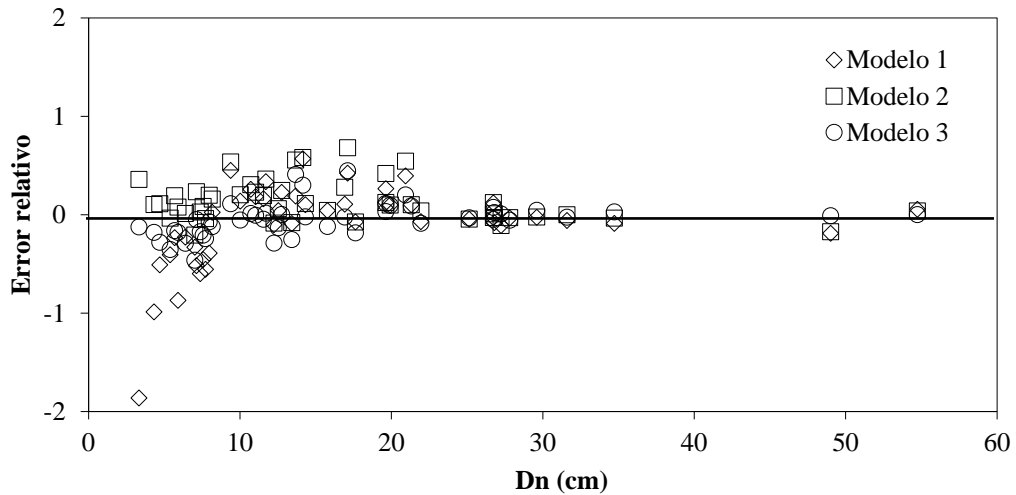


Figura 2.5 Error relativo en la estimación de la Bt en los diferentes diámetros del árbol.

El modelo seleccionado con variables indicadoras es equivalente a tener dos modelos específicos para cada grupo (Figura 2.4), los cuales son estadísticamente diferentes. Es probable que las diferencias en los pesos secos sean atribuibles al efecto de la densidad de la madera (Kuyah, *et al.*, 2012; Fayolle *et al.*, 2013) y a la arquitectura del árbol (Basuki *et al.*, 2009). Así mismo, el ajuste de un modelo con variables indicadoras provoca mayor robustez en el modelo en comparación con el ajuste individual. Además, el desarrollo de ecuaciones específicas para especies locales es importante para mejorar la precisión en la estimación de biomasa, porque las condiciones ambientales o estructurales influyen en la alometría del árbol, diámetro: altura, de la misma manera que la variación originada por la localización geográfica (Feldpausch *et al.*, 2011; Banin *et al.*, 2012; Fayolle *et al.*, 2013).

2.4.4 Partición de biomasa

El sistema de ecuaciones de partición de biomasa en cada especie cumple la propiedad de *aditividad*, con ello se logra una consistencia lógica entre las funciones de biomasa de los componentes (Bi *et al.*, 2004; Brandeis *et al.*, 2006). En otras palabras, la suma de las predicciones de los componentes estructurales (tocón, fuste, corteza, ramas y hojas) es igual a la predicción total del árbol (Parresol, 1999, 2001; Carvalho y Parresol, 2003; Návar *et al.*, 2004; Brandeis, 2006), ya que la *Bt* es multiplicada por un factor de partición.

En todas las ecuaciones de partición de biomasa (Cuadro 2.6), se incorporó el efecto de las variables indicadoras, por lo tanto, es necesario sumar o restar el efecto de dichas variables sobre los parámetros de regresión para conocer la predicción de biomasa en algún componente estructural específico del árbol (Figura 2.6). Los valores del coeficiente de determinación ajustado en cada modelo fueron altos ($R_{Adj}^2 > 0.90$), excepto para la corteza que presentó un valor de 0.47.

Cuadro 2.6 Resultados de ajuste para estimar la partición de biomasa del árbol en las tres especies arbóreas.

Ecuación para el componente estructural	Parámetro	Estimador [†]	EE [¶]	RMSE [§] (kg)	R ² _{Adj} ^p
$B_{tocón} = (\delta_{11} + \delta_{12}Z_1 + \delta_{13}Z_2)Bt$	δ_{11}	0.0412	0.00155	1.90	0.9687
	δ_{12}	-0.0141	0.00247		
	δ_{13}	-0.0035	0.00178		
$B_{fuste} = (\theta_{11} + \theta_{12}Z_1 + \theta_{13}Z_2)Bt$	θ_{11}	0.3595	0.00212	22.84	0.9489
	θ_{12}	0.0258	0.00033		
	θ_{13}	-0.0229	0.00023		
$B_{corteza} = (\varphi_{11} + \varphi_{12}Z_1 + \varphi_{13}Z_2)Bt$	φ_{11}	0.0559	0.00323	10.65	0.4748
	φ_{12}	0.0258	0.00033		
	φ_{13}	-0.0229	0.00023		
$B_{ramas} = (\phi_{11} + \phi_{12}Z_1 + \phi_{13}Z_2)Bt$	ϕ_{11}	0.5164	0.00412	30.62	0.9662
	ϕ_{12}	-0.0757	0.00637		
	ϕ_{13}	0.0409	0.00459		
$B_{hojas} = (\varpi_{11} + \varpi_{12}Z_1 + \varpi_{13}Z_2)Bt$	ϖ_{11}	0.0268	0.00306	3.51	0.9041
	ϖ_{12}	0.0382	0.00488		
	ϖ_{13}	0.0084	0.00352		

[†]Todos los parámetros ajustados fueron significativos ($p \leq 0.0001$); [¶] EE: error estándar de los parámetros; [§] RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; ^p R^2_{Adj} : coeficiente de determinación ajustado; $\delta_{11} \dots \varpi_{11}$: parámetros de regresión de *C. dentata*; $\delta_{12} \dots \varpi_{12}$: parámetros de adicionalidad debido a *A. latifolia*; $\delta_{13} \dots \varpi_{13}$: parámetros de adicionalidad debido a *I. punctata*;; Z_1, Z_2 variables indicadoras.

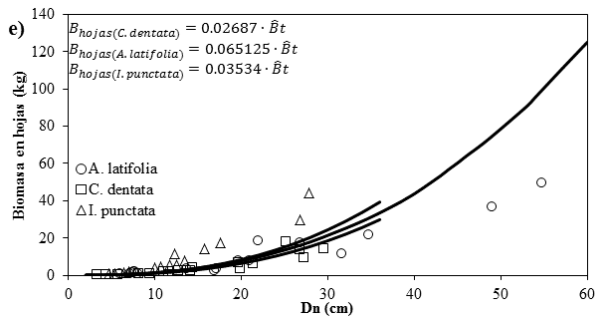
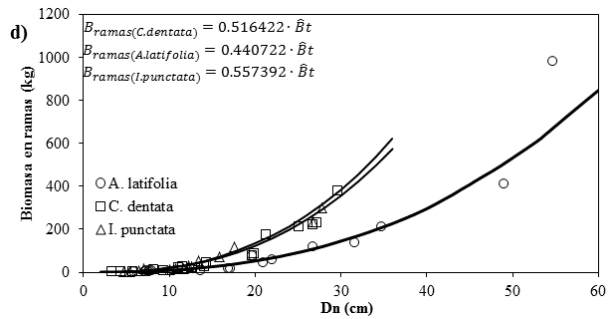
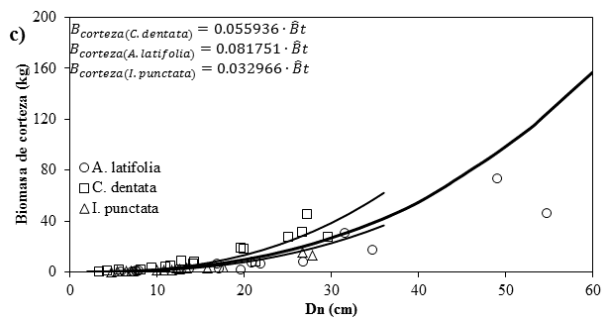
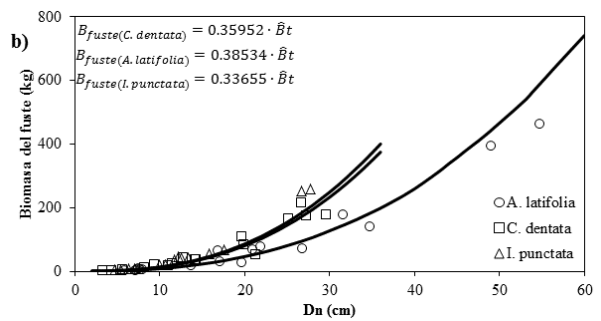
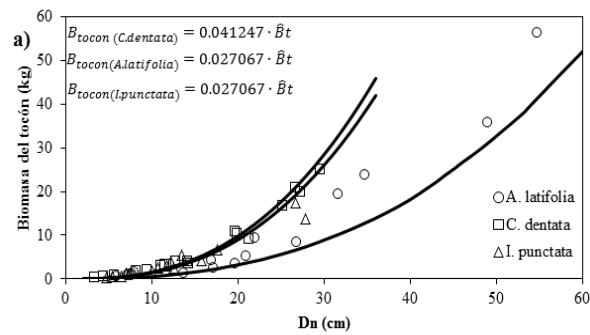


Figura 2.6 Modelos ajustados para estimar biomasa en los componentes estructurales del árbol: a) tocón, b) fuste, c) corteza, d) ramas y e) hojas.

La distribución de biomasa entre los componentes fue muy variable debido al tamaño del árbol. *C. dentata* destina en promedio la mayor cantidad de biomasa a las ramas 51.64 % y al fuste 40.69 %, seguidos de la corteza 5.59 %, el tocón 4.12% y 2.68% en las hojas. En *A. latifolia* las ramas y el fuste tuvieron la mayor distribución de biomasa con 44.07 % y 38.53% respectivamente, seguidos de la corteza 8.17 %, las hojas 6.51% y 2.70 en el tocón; y en *I. punctata* también las ramas y el fuste presentaron la mayor cantidad de biomasa con 55.73 % y 33.65%, seguidos del tocón, las hojas y la corteza con 3.77 %, 3.53 % y 3.29 %, respectivamente.

La variación de la partición de biomasa (Figura 2.7), puede ser atribuible a la competencia por luz entre los árboles, presentándose ramas pequeñas y menor cantidad de hojas en aquellas especies que tienen una posición dominante, por el contrario, en árboles que crecen en espacios abiertos, se registra la mayor cantidad de biomasa en ramas y hojas (Návar, 2009). Las ecuaciones propuestas para la biomasa total y su partición en este estudio, deben ser utilizadas dentro del intervalo de los datos obtenidos para su construcción.

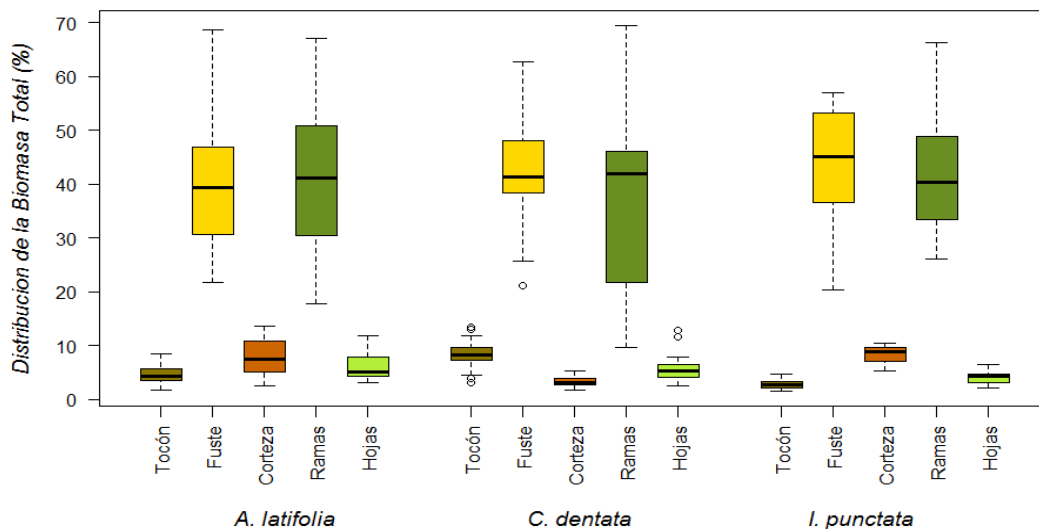


Figura 2.7 Distribución de biomasa entre componentes estructurales del árbol.

2.5 CONCLUSIONES

Se logró separar a las especies en dos grupos por medio de la adicionalidad en un modelo de regresión con variables indicadoras. La diferencia estadística entre grupos de especies es atribuible a la densidad específica de la madera y a la morfología del árbol.

Las ecuaciones alométricas propuestas para la estimación de la biomasa aérea y su partición en los distintos componentes del árbol, son de uso práctico y de fácil aplicabilidad en campo, ya que sus variables predictoras son solo el diámetro normal y la altura total.

En todos los casos, las ramas son el componente estructural del árbol que acumula mayor biomasa seguidas del fuste, la corteza, el tocón y las hojas, y esto es consistente en *C. dentata*, *A. latifolia* e *I. punctata*.

2.6 AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por la Fundación Produce Oaxaca A.C. a través del proyecto “Almacenamiento de carbono y conservación de la biodiversidad vegetal en el área de Pluma Hidalgo-Loxicha, Oaxaca”. Agradecimientos especiales a todas las personas de la finca La Cabaña por los esfuerzos dedicados, así como a los revisores que hicieron posible la elaboración de este trabajo.

2.7 LITERATURA CITADA

- Acosta, C.S. 1997. Afinidades fitogeográficas del bosque mesófilo de montaña de la zona de Pluma Hidalgo, Oaxaca, México. *Polibotánica*.6:25-39.
- Acosta-Míreles, M., J. J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez, y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36:725-736.
- Araújo, T. M., N. Higuchi, and J. A. De Carvalho J. 1999. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brazil. *For. Ecol. Manage.*117:43-52.
- Banin, L., T.R. Feldpausch, O. L. Phillips, T. R. Baker, J. Lloyd, K. Affum-Baffoe, E. J. M. M. Arets, N. J. Berry, M. Bradford, R. J. W. Brienen, , S. Davies, M. Drescher, , N. Higuchi, D. W. Hilbert, A. Hladik, Y. Iida, K. Abu Salim, A. R. Kassim, D. A. King, G. Lopez-Gonzalez, D. Metcalfe, R. Nilus, K. S.-H. Peh, J. M. Reitsma, B. Sonké, H. Taedoumg, S. Tan, L. Whit, H. Wöll, and S. L. Lewis. What controls

- tropical forest architecture? Testing environmental, structural and floristic drivers. *Global Ecol. Biogeogr.* 21:1179-1190.
- Basuki, T. M., P. E. van Laake, A.K. Skidmore, and Y. A. Hussin. 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *For. Ecol. Manage.* 257:1684-1694.
- Bi, H., J. Turner, and M. J. Lambert. 2004. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. *Trees*.18:467-479.
- Brandeis, T. J., M. Delaney, B. R. Parresol, and L. Royer. 2006. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. *For. Ecol. Manage.*233:133-142.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer. FAO. For. Pap.134, Rome, pp 55.
- Brown, S., A. J. R. Gillespie, and A. E. Lugo.1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Sci.* 35(4):881-902.
- Cairns, M.A., I. Olmsted, J. Granados, and J. Argaez. 2003. Composition and aboveground tree biomass of a dry semi-evergreen forest on Mexico's Yucatan Peninsula. *For. Ecol. Manage.*186: 125-132.
- Carvalho, J.P., and B. R. Parresol. 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *For. Ecol. Manage.* 179:269-276.
- Castellanos, F. J., A. Velázquez M., J.J. Vargas H., C. Rodríguez F., y A. M. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Agrociencia* 30: 123-128.
- Chave, J., C. Andalo, S. Brown, M. A. Cairns, J. Q. Chambers, D. Eamus, H. Fölster, F. Fromard, N. Higuchi, T. Kira, J.P. Lescure, B. W. Nelson, H. Ogawa, H. Puig, B. Riéra, and T. Yamakura. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145:87-99.
- Clutter, J.L., J.C. Forston, L.V. Pienaar, G.H. Brister, and R.L. Bailey. 1983. *Timber Management: a Quantitative Approach*. John Wiley and Sons. New York. 333p.
- Djomo, A.N., A. Ibrahima, J. Saborowski, and G. Gravenhorst. 2010. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *For. Ecol. Manage.* 260:1873-1885.
- Douterlungne, D., A. M. Herrera-Gorocica, B.G. Ferguson, I. Siddique, y L.Soto-Pinto.2013. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. *Agrociencia* 47: 385-397.

- Draper, N. R., and H. Smith. 1981. *Applied Regression Analysis*. 2da. ed. John Wiley & Sons. New York. 709 p.
- Fayolle, A., J.L. Doucet, J.F. Gillet, N. Bourland, and P. Lejeune. 2013. Tree allometry in Central Africa: Testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks. *For. Ecol. Manage.* 305:29-37.
- Feldpausch, T.R., J. Lloyd, S. L. Lewis, R. J. W. Brienen, M. Gloor, A. Monteagudo-Mendoza, G. Lopez-Gonzalez, L. Banin, K. Abu Salim, K. Affum-Baffoe, M. Alexiades, S. Almeida, I. Amaral, A. Andrade, L. E. O. C. Aragão, A. Araujo-Murakami, E.J.M.M. Arets, L. Arroyo, G.A. Aymard, T.R. Baker, O.S. Bánki, N.J. Berry, N. Cardozo, J. Chave, J.A. Comiskey, E. Alvarez, A. de Oliveira, A. Di-Fiore, G. Djagbletey, T.F. Domingues, T.L. Erwin, P.M. Fearnside, M.B. França, M.A. Freitas, N. Higuchi, E. Honorio, Y. Iida, E. Jiménez, A.R. Kassim, T.J. Killeen, F. Laurance, J.C. Lovett, Y. Malhi, B.S. Marimon, B.H. Marimon-Junior, E. Lenza, A.R. Marshall, C. Mendoza, D.J. Metcalfe, E.T.A. Mitchard, D.A. Neill, B.W. Nelson, R. Nilus, E.M. Nogueira, A. Parada, K.S.H. Peh, A. Pena-Cruz, M.C. Peñuela, N.C.A. Pitman, A. Prieto, C.A. Quesada, F. Ramírez, H. Ramírez-Angulo, J.M. Reitsma, A. Rudas, G. Saiz, R.P. Salomão, M. Schwarz, N. Silva, J.E. Silva-Espejo, M. Silveira, B. Sonké, J. Stropp, H.E. Taedoumg, S. Tan, H. ter-Steege, J. Terborgh, M. Torello-Raventos, G.M.F. van der Heijden, R. Vásquez, E. Vilanova, V.A. Vos, L. White, S. Willcock, H. Woell, and O.L. Phillips. 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosci. Discuss.* 9:2567-2622.
- Feldpausch, T.R., L. Banin, O.L. Phillips, T.R. Baker, S.L. Lewis, C.A. Quesada, K. Affum-Baffoe, E. Arets, N.J. Berry, and M. Bird. 2011. Height-diameter allometry of tropical forest trees. *Biogeosciences* 8:1081-1106.
- Fuentes S., M. 1998. Propiedades tecnológicas de las maderas mexicanas, de importancia en la construcción. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* 4:221-229.
- Henry, M., A. Besnard, W.A. Asante, J. Eshun, S. Adu-Bredu, R. Valentini, M. Bernoux, and L. Saint-Andre. 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *For. Ecol. Manage.* 260:1375-1388.
- Hitchcock, H. C., and J. P. McDonnell. 1979. "Biomass measurement: a synthesis of the literature". In: *Proceedings of the forest inventory workshop, SAF-IUFRO*. Ft. Collins, Colorado. pp: 596-614.
- INEGI. 2005. Conjunto de datos vectoriales del uso del suelo y vegetación, Serie III (continuo nacional), escala 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Aguascalientes, México.

- INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos/geograficos/20/20071.pdf>. Consultado el 18 de septiembre 2013.
- Kuyah, S., J. Dietz, C. Muthuri, R. Jamnadass, P. Mwangi, R. Coe, and H. Neufeldt. 2012. Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: I. Aboveground biomass. *Agric Ecosyst Environ.* 158:216-224.
- Martinez-Yrizar, A., J. Sarukhan, A. Perez-Jimenez, E. Rincon, J. M. Maass, A. Solis-Magallanes, and L. Cervantes. 1992. Above-ground phytomass of a tropical deciduous forest on the Coast of Jalisco, Mexico. *J. Trop. Ecol.*8:87-96.
- Monroy, R.C., y J. J. Návar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Mull. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10(2): 29-43.
- Montgomery, D. C., E. A. Peck, and G. G. Vining. 2005. Introducción al análisis de regresión lineal. Tercera edición. Ed. Continental. México.742p.
- Montgomery, D.C., and E. A. Peck.1982. Introduction to Linear Regression Analysis. John Wiley & Sons. New York New York. 504p.
- Návar, J. 2009. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *For. Ecol. Manage.*257: 427–434.
- Návar, J., E. Méndez, A. Nájera, J. Graciano, V. Dale, and B. Parresol. 2004. Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of Northeastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 59(4): 657-674.
- Návar-Cháidez, J.J. 2010. Biomass allometry for tree species of Northwestern Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems.* 12: 507-519.
- Nogueira, E.M., P. M. Fearnside, B. W. Nelson, R. I. Barbosa and E. W. H. Keizer.2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *For. Ecol. Man.* 256:1853-1867.
- Parresol, B. 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *For. Sci.* 45:573-593.
- Parresol, B. R.2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Can. J. For.Res.*31:865-878.
- Rojó-Martínez, G. E., J. Jasso-Mata., J. J. Vargas- Hernández, D. J. Palma- López, y A. Velázquez-Martínez. 2005. Biomasa aérea en plantaciones comerciales de hule (*Hevea brasiliensis* Mull. Arg.) en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 39: 449-456.

- Rutishauser, E., F. Noor'an, Y. Laumonier, J. Halperin, Rufi'ie, K. Hergoualc'h, and L.Verchot. 2013. Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *For. Ecol. Manage.* 307:219-225.
- SAS Institute Inc. 2004. *SAS/ETS® 9.1 User's Guide*. Cary, NC. 2416 p.
- Segura, M., M. Kanninen, and D. Suárez. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agrofor. Syst.* 68(2):143-150.
- Sotomayor-Castellanos, J.R. 2008. Segunda edición. TABLA FITECMA de clasificación de características mecánicas de maderas mexicanas. FITECMA. UMSNH. Formato: 30x60 cm.
- Tamarit-Urias, J. C., y Fuentes-Salinas, M.2003. Parámetros de humedad de 63 maderas latifoliadas mexicanas en función de su densidad básica. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* 9(2):155-164.
- Tamarit-Urias, J.C. y J.L. López-Torres. 2007. Xilotecnología de los principales árboles tropicales de México. Libro técnico No. 3. INIFAP-CIR Golfo Centro, Campo Experimental San Martinito, Tlahuapan, Puebla, México.

CAPÍTULO III

VOLUMEN COMERCIAL Y VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DE CARBONO EN TRES ESPECIES ARBÓREAS TROPICALES DE OAXACA, MÉXICO

3.1 RESUMEN

El objetivo de este estudio fue medir la concentración de carbono y desarrollar modelos que permitan estimar el volumen comercial, la biomasa y carbono aéreo total en tres especies arbóreas tropicales de la Sierra Sur de Oaxaca. La concentración de carbono (CC) se determinó en una muestra de 27 árboles de las especies *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd., en el fuste, las ramas y las hojas. La CC promedio inter-específica e intra-específica en las tres especies tropicales mostraron diferencias significativas. La concentración de carbono promedio ponderado (CCPP) en *C. dentata* fue de $46.29 \pm 0.29\%$, mientras que en *A. latifolia* de $45.92 \pm 0.33\%$ y en *I. punctata* de $45.43 \pm 0.3\%$. Los modelos de volumen, biomasa y carbono fueron ajustados mediante regresión lineal y no lineal con valores del coeficiente de determinación ajustado superiores a 0.95. Las ecuaciones para estimar los factores de expansión de biomasa (FEB) y los factores de expansión de carbono (FEC) variables fueron desarrollados a partir de la razón del modelo de biomasa aérea total y el volumen comercial con corteza del árbol. Es importante considerar las variaciones inter-específicas e intra-específicas de la CC en los árboles tropicales para mejorar la precisión en las estimaciones del contenido de carbono. Los factores de expansión variables de biomasa y carbono variables propuestos permiten la estimación rápida del contenido de biomasa y carbono presente en los árboles, cuando solo se dispone del volumen comercial.

Palabras clave: árboles tropicales, volumen comercial, modelos de regresión, contenido de carbono

3.2 INTRODUCCIÓN

A pesar de que el clima en nuestro planeta es dinámico y cambiante por su ciclo natural, actualmente, parte de esa variación, es consecuencia de las actividades humanas; tales como, el aumento de las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) principalmente en el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), los cuales han provocado cambios importantes en las escalas climáticas de la tierra (IPCC, 2007). La emisión de CO₂ a la atmósfera, gas de efecto invernadero, se ha intensificado por la quema de combustibles fósiles y el cambio del uso del suelo (Dixon *et al.*, 1994). Este continuo incremento en la concentración atmosférica de CO₂, prevé que conducirá a cambios significativos en el clima (Houghton *et al.*, 1996; Friedlingstein *et al.*, 2001).

La vegetación y el suelo presente en los ecosistemas terrestres desempeñan un papel importante en el ciclo del carbono y en las variaciones de CO₂ atmosférico (Cao y Woodward, 1998; Cramer *et al.*, 2001), requiriéndose una mejor comprensión y definición de la dinámica del balance de carbono a diferentes escalas, tanto para la interpretación de las variaciones observadas en el intercambio carbono entre la atmósfera-biosfera, como para la evaluación de las políticas para mitigar las emisiones antropogénicas de CO₂ (Fung *et al.* 1997). Por lo tanto, los bosques contribuyen potencialmente a mitigar el cambio climático global, gracias a su influencia sobre el ciclo global del carbono, ya que almacenan grandes cantidades de este en la vegetación y el suelo, lo intercambian con la atmósfera a través de la fotosíntesis y la respiración (Brown, 1997).

En la estimación de la biomasa y el contenido de carbono presente en el arbolado en pie, en un rodal o en una área más extensa, frecuentemente se utiliza la metodología basada en la información obtenida del inventario forestal, convirtiendo el volumen comercial (m³) a biomasa (kg) y carbono (kg) utilizando los factores de expansión de biomasa (FEB) y los factores de expansión de carbono (FEC) (Somogyi *et al.*, 2006; Návar-Cháidez, 2009). De la misma manera, es común el uso de ecuaciones alométricas, donde las variables predictoras son el diámetro normal, altura total y el volumen comercial del árbol. Los FEB y los FEC multiplican el volumen comercial por un factor apropiado para obtener la biomasa aérea total (*Bt*) y el carbono aéreo total del árbol (*Ct*), es decir; la proporción de la *Bt* o el *Ct* por unidad de volumen del árbol (Somogyi *et al.* 2006; Silva-Arredondo y Návar-

Cháidez, 2010). Los FEB dependen principalmente de la especie, características ambientales, edad, estructura del rodal y calidad de la estación (Aalde *et al.*, 2006; Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2009); así mismo, los FEC pueden ser afectados por el crecimiento en la distribución de la biomasa y la concentración de carbono (Bert y Danjon, 2006; Fukatsu, *et al.*, 2008).

El contenido de carbono almacenado en la biomasa es generalmente considerado como el 50% del peso seco de la biomasa seca (Cairns *et al.*, 1997; Basuki *et al.*, 2009), independientemente de las especies, componente estructural del árbol y tipo de bosque. Por otra parte, en algunos estudios muestran que la concentración de carbono puede variar entre 44.4-47-59% (Lamlom y Savidge, 2003); variación que está en función de la especie y del tejido (Gayoso y Guerra, 2005; Martin y Thomas, 2011), así como la técnica empleada para su determinación (Gayoso y Guerra, 2005; Bert y Danjon, 2006). Las variaciones inter-específicas e intra-específicas en las concentraciones de carbono en las especies arbóreas, deben ser consideradas y tomadas en cuenta para mejorar la precisión en las estimaciones del contenido de carbono a nivel árbol y del bosque (Fukatsu *et al.*, 2008), así como en los modelos estructurales-funcionales (Bert y Danjon, 2006). A pesar de la importancia de la cuantificación de la biomasa y carbono, son pocas las investigaciones al respecto en nuestro país (Figueroa-Navarro, *et al.*, 2005; Silva-Arredondo y Návar-Cháidez, 2009; Yerena *et al.*, 2012), por lo anterior, es importante generar herramientas que permitan estimar de manera más precisa y rápida estos parámetros, al mismo tiempo, conocer a nivel local la cantidad y la variación de carbono almacenado en las diferentes especies y en los componentes estructurales del árbol.

Considerando lo anterior, los objetivos planteados para este estudio fueron: a) medir y comparar la concentración de carbono inter-específica e intra-específica en las especies arbóreas nativas de la Sierra Sur de Oaxaca, *Cupania dentata* DC., *Alchornea latifolia* Sw. e *Inga punctata* Willd., y b) desarrollar ecuaciones para estimar los factores de expansión de biomasa y de carbono variables a nivel de árbol para su aplicabilidad a inventarios forestales.

3.3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el predio de la finca La Cabaña, ubicada en el municipio de Pluma Hidalgo Oaxaca (Figura 3.1). Las características del área de estudio son las mismas a las descritas en el capítulo II. Fueron derribados un total de 48 árboles, 17 corresponden a *Cupania dentata*, 17 a *Alchornea latifolia* y 14 en *Inga punctata*.

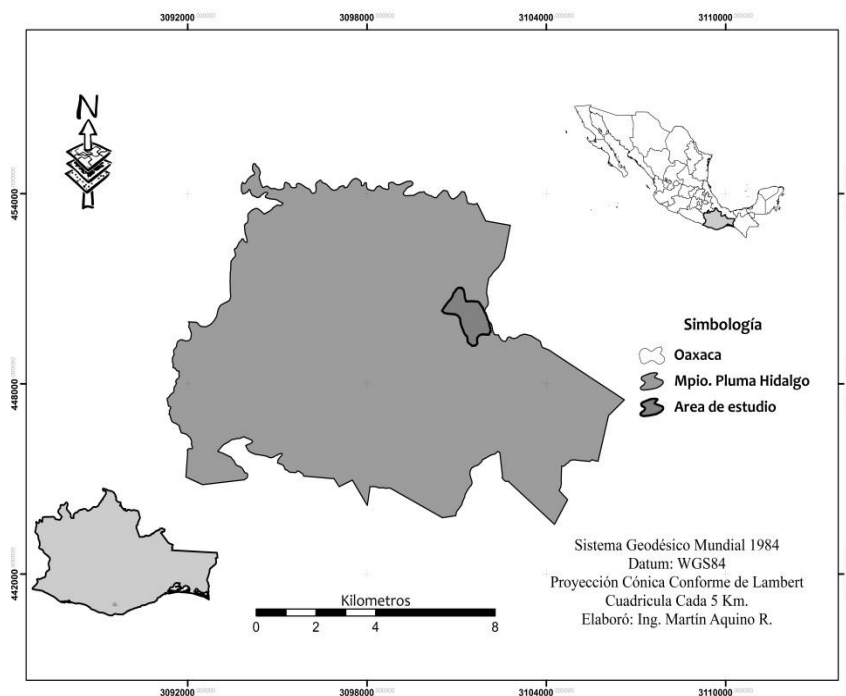


Figura 3.1 Localización del área de estudio.

3.3.2 Modelos de regresión para estimar el volumen comercial

El fuste comercial fue definido hasta que el tronco se empezó a bifurcar en la copa de árbol, el cual una vez derribado, fue seccionado en trozas de 1 m de longitud. En cada troza se midieron los diámetros superior e inferior, así como la longitud con cinta métrica. El volumen comercial fue obtenido por el método de trozas traslapadas (Bailey, 1995). Antes del derribo, se procedió a la medición del diámetro normal (D_n) a una altura de 1.30 m sobre el nivel del suelo con cinta diamétrica; posterior al derribo, se midió la altura total del árbol (H) con cinta métrica.

El volumen de las tres especies se analizó de manera conjunta para conocer la posibilidad de agruparlas como una sola especie o grupos de especies, y poder definir en una sola ecuación el comportamiento de las mismas, para ello se desarrolló una prueba de adicionalidad en el modelo de la variable combinada incorporando variables indicadoras (variables dummy). El modelo fue el siguiente, considerando a *I. punctata* como especie base:

$$Vol = [\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2] + [\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2] (Dn^2 H k) + \varepsilon$$

$$Z_1 = \begin{cases} 1, & \text{si pertenece a } C. dentata \\ 0, & \text{de otra forma} \end{cases}$$

$$Z_2 = \begin{cases} 1, & \text{si pertenece a } A. latifolia \\ 0, & \text{de otra forma} \end{cases}$$

Se propusieron tres modelos de regresión parsimonios frecuentemente utilizados para la estimación del volumen en el ámbito forestal (Clutter *et al.*, 1983), donde expresan al volumen (m³) como una función del diámetro (cm), altura total (m) y un factor de forma (F):

$$Vol = f(Dn, H, F) + \varepsilon$$

Los modelos fueron ajustados por la técnica de regresión lineal y no lineal de acuerdo a su estructura, incorporando variables indicadoras:

Variable combinada..... $Bt = [\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2] + [\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2] (Dn^2 H) + \varepsilon$

Variable combinada logarítmica... $Bt = Exp^{[\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2]} (Dn^2 H)^{[\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2]} + \varepsilon$

Shumacher-Hall..... $Bt = Exp^{[\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2]} Dn^{[\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2]} H^{\beta_3} + \varepsilon$

Donde el *Vol* corresponde al volumen de fuste comercial (m³), *Dn* es el diámetro normal (cm), *H* es la altura total (m); $\alpha_0, \beta_0, \beta_3$ parámetros son los parámetros de regresión; Z_1, Z_2 las variables indicadoras; $k = \pi/40000$, *Exp* base de los logaritmos neperianos ($e = 2.7182$) y ε es el error aleatorio. Para comparar estos modelos y seleccionar el mejor, se consideró el coeficiente de determinación ajustado (R_{Adj}^2) que expresa la variabilidad explicada por el

modelo tomando en cuenta el número de parámetros, la raíz de los cuadrados medios del error (RMSE) que define la precisión de las estimaciones y el coeficiente de variación en % (CV), mismos que se calcularon de la siguiente forma:

$$R_{Adj}^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 / (n - 1)} \right]$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / (n - p)}$$

$$CV(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p)}}{\bar{y}} \cdot 100$$

Donde $y_i, \hat{y}_i, \bar{y}_i$ es el volumen comercial del fuste del árbol observado, predicho y medio; n es el número de observaciones y p es el número de parámetros del modelo.

3.3.3 Determinación de la concentración de carbono

De los 48 árboles derribados para obtener la biomasa aérea total en el capítulo II, solo se seleccionaron 27 para realizar el análisis de la concentración de carbono. Para ellos se conformaron tres categorías diamétricas para cada una de las especies arbóreas: la primera corresponde a menores a 10 cm, la segunda, mayores a 10 cm y menores a 20 cm y la última correspondiente a mayores a 20 cm de diámetro. En cada categoría diamétrica se seleccionaron tres árboles de manera aleatoria, de donde se obtuvieron tres muestras (probetas) de las ramas, tres muestras de 0.5 kg en hojas y una muestra en el tronco a una altura de 1.30 m sobre el nivel de suelo (diámetro normal), los cuales permitieron preparar una muestra compuesta para cada uno de los componentes estructurales del árbol. De todas las muestras obtenidas en ramas y tronco, se extrajo una submuestra de 20 g que incluyó la albura, duramen y corteza, mientras que las hojas, incluyeron flores y frutos, los cuales fueron finamente picados con herramientas de carpintería. Posteriormente, para lograr la homogeneidad en el material de las submuestras, se llevaron a un molino de material

vegetal Thomas-Wiley Modelo 4 hasta que pasaran una malla de 20 mm y por último, para conseguir partículas más finas del material vegetal se colocaron en un molino General Electric Mod. 5KH39QN5525 hasta pasar por una malla de 1 mm. Todas las submuestras fueron llevadas a una estufa de secado a 70° C por 24 horas, o hasta alcanzar un peso constante, para eliminar la humedad absorbida del ambiente. En todas las submuestras se obtuvo una porción de 30 mg, las cuales fueron pesadas en una balanza analítica con una precisión de 0.0001g, posteriormente, se colocaron en un analizador automático de carbono Shimadzu TOC 5050-A para determinar la concentración de carbono por la técnica de combustión seca en el Laboratorio de Fertilidad de Suelo y Química Ambiental del Colegio de Postgraduados. Las curvas de calibración de la concentración de carbono fueron construidas con sacarosa, después de cada 10 muestras determinadas aproximadamente 20 mg de sacarosa fue medido para compensar el error de medición.

3.3.4 Análisis estadístico de la concentración de carbono

Se aplicó la prueba Shapiro-Wilk para definir si existe ajuste a la normalidad en la concentración de carbono. Para excluir el efecto de la distribución de biomasa en la concentración de carbono (CC) promedio en las comparaciones inter-específicas, se calculó la concentración de carbono promedio ponderado (CCPP) en cada especie (Zhang *et al.*, 2009) de la siguiente forma:

$$CCPP = \sum_{i=1}^n (C_i) \times P_i$$

Donde C_i es el valor de la concentración de carbono para i componente estructural del árbol, P_i es la proporción de la biomasa del i componente con respecto a la biomasa total y n el número de componentes en la biomasa total. Posteriormente se realizó un análisis factorial 3x3 con tres repeticiones (Cuadro 1), con los valores de la concentración de carbono para conocer el efecto de los factores: especie, categoría diamétrica y componente estructural, obteniéndose el Análisis de Varianza (ANOVA) correspondiente. Así mismo, se realizó una prueba de comparación de medias Tukey's HSD (Honest Significant Difference) para conocer la variabilidad específica de carbono en los árboles dependiendo de su especie, categoría y componente estructural.

Cuadro 3.1 Factores y niveles para el análisis de varianza en la concentración de carbono (CC).

Factor	Niveles
Especie (E)	E_1 <i>C. dentata</i>
	E_2 <i>A. latifolia</i>
	E_3 <i>I. punctata</i>
Componente estructural (CE)	CE_T Tronco
	CE_R Ramas
	CE_H Hojas
Categoría diamétrica (CD)	CD_1 Menor a 10 cm
	CD_2 Entre 10-20 cm
	CD_3 Mayor a 20 cm

El modelo lineal utilizado para el análisis fue el siguiente:

$$CC_{ijkl} = \mu + E_i + CE_j + CD_k + (ECE)_{ij} + (ECD)_{ik} + (CECD)_{jk} + (ECECD)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$i=1, 2, 3; j=1, 2, 3; k=1, 2, 3; l=1, 2, 3$$

μ = efecto medio general

E_i = efecto atribuido al i -ésimo nivel del factor especie

CE_j = efecto atribuido al j -ésimo nivel del factor componente estructural

CD_k = efecto atribuido al k -ésimo nivel del factor categoría diamétrica

ECE_{ij} = efecto atribuido a la interacción entre el i -ésimo nivel del factor especie y el j -ésimo nivel del factor componente estructural

ECD_{ik} = efecto atribuido a la interacción entre el i -ésimo nivel del factor especie y el k -ésimo nivel del factor categoría diamétrica

$CECD_{ij}$ = efecto atribuido a la interacción entre el j -ésimo nivel del factor componente estructural y el k -ésimo nivel del factor categoría diamétrica

$ECECD_{ijk}$ = efecto atribuido a la interacción entre el i -ésimo nivel del factor especie, el j -ésimo nivel del factor componente estructural y el k -ésimo nivel del factor categoría diamétrica

ε_{ijkl} = error aleatorio, $\varepsilon_{ijkl} \sim N(0, \sigma^2)$

3.3.5 Modelo para estimar la cantidad de carbono

Para conocer la cantidad de carbono almacenado en los componentes estructurales de los árboles derribados, se utilizaron los valores obtenidos de la concentración de carbono (CC) en el laboratorio, multiplicando los datos de biomasa del capítulo II por la CC de la siguiente forma:

$$C_{componente} = Bt_{componente} \times CC$$

Donde $C_{componente}$ corresponde al contenido de carbono en el componente estructural del árbol (kg), $Bt_{componente}$ es la biomasa total del componente (kg) y CC la concentración de carbono (%). La suma del contenido carbono en todos los componentes del árbol corresponde al carbono total almacenado en el árbol. Se seleccionó el mismo modelo utilizado para estimar la biomasa aérea total (Bt) en el capítulo II, para ajustar el contenido de carbono en cada una de las especies arbóreas tropicales, expresado de la siguiente forma:

$$Ct = Exp^{\alpha_0} \times Dn^{\beta_1} \times H^{\beta_2} + \varepsilon$$

En donde Ct es el contenido de carbono aéreo total (kg), Dn corresponde al diámetro normal (cm), H es la altura total (m), $\alpha_0, \beta_1, \beta_2$ son los parámetros de regresión, Exp base de los logaritmos neperianos y ε el error aleatorio.

3.3.6 Factores de expansión de biomasa y carbono

Para estimar la biomasa aérea total del árbol (Bt) o el carbono aéreo total (kg) a partir del volumen comercial (m^3) se ajustaron dos modelos lineales que expresan el vol como una función directa de la Bt y el Ct , bajo este supuesto; el primer modelo multiplica el vol por un factor de expansión de biomasa (FEB) variable, expresado de la siguiente forma:

$$Bt = [\varphi_0 + (\varphi_1 \times I_1) + (\varphi_2 \times I_2)] + [\omega_0 + (\omega_1 \times I_1) + (\omega_2 \times I_2)] \times vol$$

Así mismo, el segundo modelo multiplica al vol por un factor de expansión de carbono (FEC) variable, de la siguiente forma:

$$Ct = [\gamma_0 + (\gamma_1 \times I_1) + (\gamma_2 \times I_2)] + [\delta_0 + (\delta_1 \times I_1) + (\delta_2 \times I_2)] \times vol$$

$$I_1 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a } Alchornea \text{ latifolia} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

$$I_2 = \begin{cases} 1, \text{ si pertenece a } I. \text{ punctata} \\ 0, \text{ de otra forma} \end{cases}$$

Donde Bt , Ct , vol es la biomasa aérea total del árbol (kg), carbono aéreo total (kg) y volumen de fuste comercial (m^3) respectivamente, φ_0 , φ_1 , φ_2 , ω_0 , γ_0 , γ_1 , γ_2 , δ_0 , δ_1 , δ_2 son los parámetros de regresión, I_1 y I_2 las variables indicadoras. Se consideró a *C. dentata* como la especie base en el modelo por presentar mayor número de observaciones. Para poder agrupar a las especies como un solo grupo o grupos de especies, se consideró homogeneidad de interceptos y de pendientes ($H_0=\alpha_1=\alpha_2=\beta_1=\beta_2=0$).

El ajuste de los modelos y el análisis estadístico se realizó con R project 2.13.1 (R Development Core Team, 2011)

3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1 Variaciones en la concentración de carbono

De acuerdo a los análisis de varianza, la concentración de carbono (CC) entre los componentes estructurales y categorías diamétricas fue estadísticamente diferentes para *C. dentata* ($F_{2,18}=25.19$, $p\leq 0.001$ y $F_{2,18}=8.78$, $p\leq 0.0001$), mientras que para *A. latifolia* las diferencias estadísticas en la CC solo fueron en la categoría diamétrica ($F_{2,18}=6.45$, $p\leq 0.001$) y en la interacción categoría diamétrica-componente estructural ($F_{4,18}=4.68$, $p\leq 0.001$); en *I. punctata* las diferencias estadísticas solo se presentaron en los componentes estructurales ($F_{2,18}=3.94$, $p\leq 0.05$). A nivel de especie, la prueba de comparación múltiples de medias de Tukey's HSD para las interacciones de los componentes estructurales-categorías diamétricas y la prueba de comparaciones múltiples por el método de Bonferroni mostraron que el tamaño del árbol en las tres especies no influye en la CC promedio en los componentes del árbol (Figura 3.2). La mayor CC promedio en *C. dentata* se encontró en las hojas (47.71%), seguido del fuste (46.29%) y las ramas (46.11%) las cuales no presentaron diferencias significativas ($p>0.05$). Por otra parte, en *A. latifolia* las CC promedio en los componentes estructurales no mostraron diferencias significativas

($p > 0.05$), con valores en el fuste (45.56 %), ramas (46.39 %) y hojas (46.07 %) muy similares.

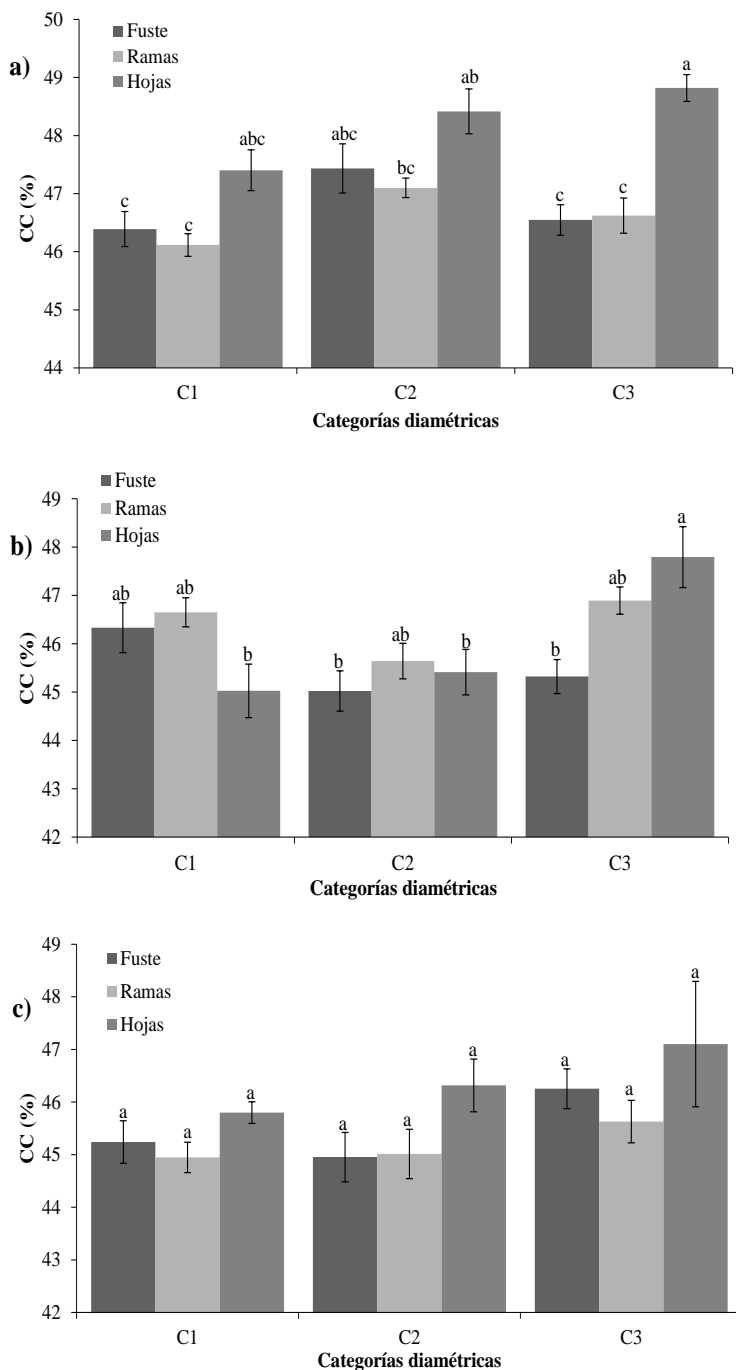


Figura 3.2. Comparación intra-específica de la concentración de carbono (CC) considerando la categoría diamétrica y el componente estructural para a) *C. dentata*, b) *A. latifolia* y c) *I. punctata*. Medias (n=3) con letras distintas son diferentes ($p \leq 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de Tukey's HSD.

Así mismo, en *I. punctata* la CC promedio en hojas (46.4%) y fuste (45.48%) no son estadísticamente diferentes ($p>0.05$), ni tampoco hay diferencias significativas entre la CC promedio de las ramas (45.19%) y el fuste. La CC fue significativamente diferente entre las especies bajo estudio ($F_{2,78}=25.19$, $p\leq 0.001$) al excluir el factor componente estructural y categoría diamétrica. La CC promedio de *A. latifolia* fue de $46.01\pm 0.21\%$ y en *I. punctata* de $45.69\pm 0.20\%$ los cuales no fueron estadísticamente diferentes ($p>0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de medias de Tukey's HSD; mientras que la CC promedio en *C. dentata* fue mayor a las otras dos especies con $46.71\pm 0.19\%$ y por lo tanto estadísticamente diferente ($p<0.05$) (Figura 3.3). Así mismo, el contenido de carbono promedio ponderado (CCPP) para *C. dentata* fue de $46.29\pm 0.29\%$, en *A. latifolia* de $45.92\pm 0.33\%$ y en *I. punctata* de 45.43 ± 0.3 (Cuadro 3.2). Los valores promedios de las concentraciones de carbono obtenidas en los componentes del árbol y los promedios ponderados por especie en este estudio fueron significativamente diferentes ($p\leq 0.0001$) al valor de 50% frecuentemente utilizado en la literatura para estimar la cantidad de carbono en la biomasa seca.

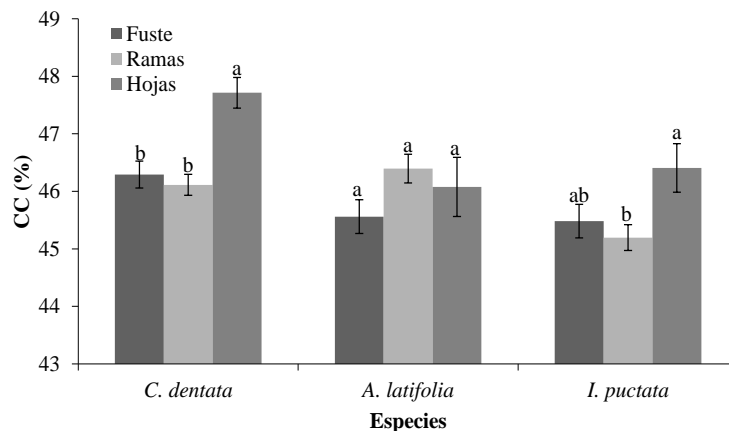


Figura 3.3. Comparación intra-específica de la concentración de carbono (CC) en las tres especies tropicales. Medias (n=9) con letras distintas son diferentes ($p\leq 0.05$) de acuerdo a la prueba de comparación de Tukey's HSD.

Cuadro 3.2. Concentración de carbono (CC, %) entre componentes estructurales del árbol y concentración de carbono promedio ponderado (CCPP, %) en las tres especies tropicales.

Especie	CD [†]	Componente estructural			CCPP [¶]
		Tronco	Ramas	Hojas	
<i>C. dentata</i>	CD ₁	45.89	45.62	46.90	45.87
	CD ₂	46.93	46.60	47.92	46.84
	CD ₃	46.05	46.12	48.32	46.15
		46.29±0.32	46.11±0.28	47.71±0.42	46.29±0.29
<i>A. latifolia</i>	CD ₁	46.33	46.65	45.03	46.33
	CD ₂	45.02	45.64	45.41	45.26
	CD ₃	45.32	46.89	47.79	46.16
		45.56±0.39	46.39±0.38	46.08±0.86	45.92±0.33
<i>I. punctata</i>	CD ₁	45.24	44.95	45.80	45.17
	CD ₂	44.95	45.01	46.32	45.10
	CD ₃	46.25	45.63	47.10	46.03
	Promedio±EE [§]	45.48±0.39	45.20±0.22	46.41±0.38	45.43±0.3

[†]CD: categoría diamétrica; CD₁: árboles con un diámetro menor a 10 cm, CD₂ arboles con diámetro de 10-20 cm, CD₃ árboles con diámetros mayores a 20 cm; [¶]CCPP concentración de carbono promedio ponderado; [§]EE error estándar.

Los valores obtenidos de la concentración de carbono en las tres especies son similares a los reportados en otros estudios para latifoliadas, por ejemplo, Elias y Potvin (2003), registraron que la concentración de C tuvo una variación entre 44.4% y 49.4% en 32 especies tropicales de Panamá; Figueroa *et al.* (2005), determinaron la concentración de C en 6 especies tropicales de la Sierra Norte de Oaxaca con valores de 47.3 a 51.3%; por otro lado, Gayoso y Guerra (2005) determinaron valores de 34.86% a 48.31% para 16 especies de bosques nativos de Chile. La concentración de C en latifoliadas es inferior comparado con las coníferas. Se ha encontrado que los valores en coníferas varían de 47.21 %-55.20% mientras que en latifoliadas de 46.27%- 49.97% (Lamlom y Savidge, 2003). Por otro lado, la concentración de C puede estar en un intervalo de 47 a 59 % como una función de los compartimentos del árbol o de las especies (Elias y Potvin, 2003; Lamlom y Savidge, 2003).

Comparar las concentraciones de carbono con otros estudios puede ser complicado debido a las diferencias en el tipo de vegetación, técnicas de manejo, método de muestreo y la técnica empleada para la determinación de carbono; así como edad del árbol y condiciones climáticas (Bert y Danjon, 2006). Las variaciones en las concentraciones de C en los diferentes componentes estructurales del árbol y entre especies, se debe a que la biomasa de las plantas está conformada de moléculas orgánicas con proporciones variables de carbono; es decir, la biomasa de la madera está conformada principalmente de la lignina (18–35%) y la holocelulosa (65–75%), esta última compuesta de α -celulosa y hemicelulosa; además, en la madera se encuentran otros materiales como extractos orgánicos y minerales orgánicos (cenizas) que representan aproximadamente de 4-10% de la biomasa; los extractos se componen de grasas, ceras, alcaloides, proteínas, compuestos fenólicos simples y compuestos, azúcares simples, pectinas, mucilagos, gomas, resinas, terpenos, almidones, glucósidos, saponinas y aceites esenciales (Bert y Danjon, 2006).

La relación lignina: holocelulosa es el principal factor que modifica la concentración de carbono en las diferentes partes del árbol, así como la variación de los extractos y minerales. Las diferencias en las concentraciones de carbono entre los componentes del árbol fueron consistentes, presentándose mayor concentración de C en las hojas y ramas que en el fuste. Estas diferencias fueron atribuibles a que en las hojas se tiene mayor acumulación de carbohidratos (Watson y Casper, 1984); por otro lado, la madera juvenil que se encuentra en las ramas tiene una mayor concentración de lignina y extractos que la madera adulta que se encuentra por debajo de la copa y por lo tanto tendrá una alta concentración de carbono (Bert y Danjon, 2006), además, en las ramas se realiza la diferenciación y elongación de los meristemos que darán origen a los órganos reproductivos o vegetativos (Watson y Casper, 1984); mientras que el fuste está constituido principalmente de lignina y celulosa.

Por otro lado, se realizó una prueba de *t-student* para muestras pareadas para comparar la cantidad de carbono de los árboles derribados en el capítulo II considerando la variabilidad de la concentración de carbono intra- específica e inter- específica, y el valor genérico de 50% frecuentemente utilizado en la estimación del contenido de carbono. El resultado obtenido de la prueba, muestra diferencias significativas entre los valores de la cantidad de

carbono considerando la variabilidad intra- específica e inter-específica de la concentración de C y la cantidad de carbono comparado con el valor de 50% sin importar la especie ni componente estructural del árbol ($t=-4.7936$, $gl=47$, $p\leq 0.0001$). El error relativo promedio de la cantidad de C en *C. dentata* es de 7.88 ± 0.24 %, en *A. latifolia* de 8.68 ± 0.26 % y del 10.49 ± 0.22 en *I. punctata* cuando se realiza estimaciones de la cantidad de C ignorando la variación intra-específica en la concentración de carbono (Figura 3.4), en otras palabras, utilizar el valor genérico de 50% en las estimaciones de C genera una sobre-estimación en la cantidad de carbono en las especies bajo estudio.

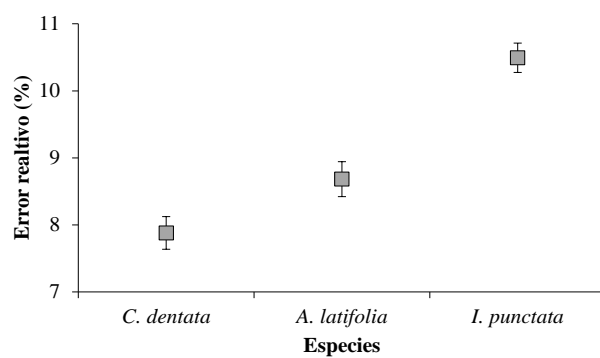


Figura 3.4. Error relativo ignorando la variación inter-específica e intra-específica en la concentración de C en las especies tropicales, considerando que el 50% de C corresponde a la biomasa seca.

3.4.2 Estimación del volumen comercial

Para la especie de *C. dentata* y *A. latifolia* que presentaron el mayor número de individuos con 17, el volumen comercial promedio con corteza fue de 0.1427 m^3 y 0.2812 m^3 respectivamente, mientras que para *I. punctata* el volumen comercial promedio con corteza fue de 0.1217 m^3 con 14 individuos (Cuadro 3.3).

El coeficiente de forma para *C. dentata* es de 0.33 y para *A. latifolia* es de 0.24, mientras que en *I. punctata* de 0.39. Los resultados obtenidos de la prueba de adicionalidad simple con el modelo de la variable combinada, indican que la especie de *C. dentata* e *I. punctata* pueden modelarse bajo una misma hipótesis de modelo (Grupo1), esto es, se pueden agrupar como una sola especie para su ajuste, mientras que *A. latifolia* es estadísticamente diferente ($p<0.05$) a las de este grupo, conformando al Grupo 2 (Cuadro 3.4). Para poder

rechazar estos resultados sería necesario obtener una muestra más amplia de árboles de las tres especies, cubriendo un amplio intervalo de diámetros y realizar las mismas pruebas de hipótesis.

Cuadro 3.3. Principales parámetros dendrométricos y volumen de fuste comercial de los árboles derribados.

Especie	N [†]	Promedio, Mínimo-Máximo		
		Dn [¶] (cm)	H [§] (m)	Vol ^p (m ³)
<i>C. dentata</i>	17	20.64(5.92-54.75)	14.36(8.12-27.20)	0.1427(0.0029-0.4528)
<i>A. latifolia</i>	17	15.55(3.34-29.60)	13.99(6.90-20.15)	0.2812(0.0099-1.4143)
<i>I. punctata</i>	14	14.28(4.71-27.82)	14.52 (9.70-20.20)	0.1217(0.0089-0.4791)

†N: número de observaciones; ¶Dn: diámetro normal (cm); §H: altura total del árbol (m); ^pvol: volumen de fuste comercial (m³).

Cuadro 3.4. Resultados de la prueba de adicionalidad para la agrupación de especies con el modelo: $Vol = [\alpha_0 + \alpha_1 Z_1 + \alpha_2 Z_2] + [\beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2] (Dn^2 Hk) + \varepsilon$.

Especie	Parámetros estimados			
	Símbolo	Valor	EE	Pr > t
<i>I. punctata</i>	α_0	0.005186	0.0264	0.8457
	β_0	0.3952	0.0562	<0.0001
<i>C. dentata</i>	α_1	0.00466	0.0376	0.9021
	β_1	-0.05931	0.0740	0.4279
<i>A. latifolia</i>	α_2	0.0467	0.0343	0.1816
	β_2	-0.15151	0.0575	0.0117

α_0, β_0 parámetros de regresión; α_1, β_1 parámetros de adicionalidad debido *C. dentata*; α_2, β_2 parámetros de adicionalidad debido a *A. latifolia*.

Los resultados de ajuste de los modelos seleccionados para estimar el volumen de fuste comercial en los dos grupos de especies, presentan en general buenos estadísticos, es decir, un coeficiente de determinación ajustado superior a 0.91 (Cuadro 3.5); sin embargo, en los estadísticos de RMSE y CV, el modelo Schumacher-Hall presenta los valores más bajos, por lo cual fue seleccionado.

Cuadro 3.5. Resultados de ajuste de los modelos con variables indicadoras para estimar volumen comercial.

Modelo	Parámetros estimados			RMSE [¶] (m ³)	CV [§] (%)	^p R ² _{Adj}
	Símbolo	Valor	EE [†]			
Variable combinada	α_0	0.026474 ^{ns}	0.0143	0.0775	41.73	0.9193
	β_0	0.000026***	2.568E-6			
	β_1	-6.53E-6***	2.534E-6			
Variable combinada logarítmica	α_0	8.5438***	0.4077	0.0641	34.52	0.9448
	β_0	0.795344***	0.0444			
	β_1	-0.00151 ^{ns}	0.00958			
Shumacher-Hall	α_0	8.29357***	0.3194	0.0452	24.34	0.9725
	β_0	2.1230***	0.1116			
	β_1	-0.0512***	0.0218			
	β_2	0.110895 ^{ns}	0.0963			

[†]EE: error estándar de los parámetros; [¶]RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; [§]CV: coeficiente de variación; ^pR²_{Adj}: coeficiente de determinación ajustado; $\alpha_0, \beta_0, \beta_2$ parámetros de regresión; β_1 parámetro de adicionalidad debido al Grupo 2; ***p≤.0001; ^{ns} no significativo p>0.05.

Los parámetros de adicionalidad estimados en el modelo seleccionado, es equivalente a tener dos ecuaciones:

$$vol_{(Grupo1)} = Exp^{(-8.2935)} \times Dn^{2.1230} \times H^{0.1108}$$

$$vol_{(Grupo2)} = Exp^{(-8.2935)} \times Dn^{2.0718} \times H^{0.1108}$$

Como se puede observar en estas dos ecuaciones, el volumen del Grupo 1 es mayor al del Grupo 2 cuando presentan la misma altura y el mismo diámetro (Figura 3.5), estos resultados son congruentes con los coeficientes de forma obtenidos por especie, es decir, los árboles del Grupo1 son más cilíndricos que los del Grupo 2.

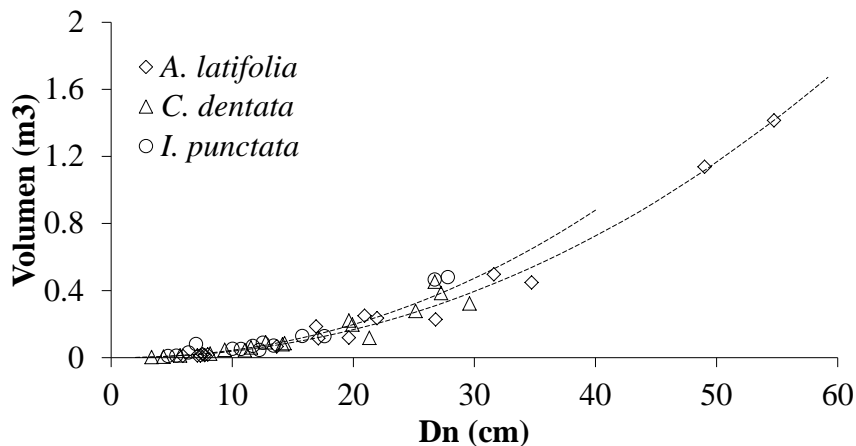


Figura 3.5. Modelo ajustado para estimar volumen de fuste comercial (m³) para los dos grupos de especies.

3.4.3 Estimación de carbono aéreo total

El modelo de Schumacher-Hall fue seleccionado para la estimación de la cantidad de carbono aéreo total en las tres especies arbóreas, mismo que presento excelentes ajustes y mejor comportamiento para la estimación de biomasa aérea total en capítulo II. Los parámetros estimados fueron significativos en el modelo y el coeficiente de determinación ajustado fue de 0.99, así como un error estándar de 7.56 kg (Cuadro 3.6).

Figura 3.6. Resultados de ajuste de los modelos para estimar el contenido de carbono aéreo (Ct).

Parámetros estimados			RMSE [¶] (kg)	R_{Adj}^2 [§]
Símbolo	Valor	EE [†]		
α_0	4.177307***	0.1310	7.56	0.9969
β_0	2.4872***	0.0462		
β_1	-0.2113***	0.0079		
β_2	0.506852***	0.0366		

[†]EE: error estándar de los parámetros; [¶]RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; [§] R_{Adj}^2 : coeficiente de determinación ajustado; $\alpha_0, \beta_0, \beta_2$ parámetros de regresión; β_1 parámetro de adicionalidad debido al Grupo 2; ***p≤.0001.

Los parámetros estimados de adicionalidad del modelo son equivalentes a tener dos ecuaciones, uno para cada grupo de especies de la siguiente forma:

$$Ct_{(Grupol)} = Exp^{(-4.1773)} \times Dn^{2.4872} \times H^{0.5068}$$

$$Ct_{(Grupol)} = Exp^{(-4.1773)} \times Dn^{2.2759} \times H^{0.5068}$$

Los resultados obtenidos del ajuste del modelo confirman las conclusiones obtenidas en el capítulo II, el Grupo 1 presenta mayor cantidad de carbono (kg) que el Grupo 2 cuando presentan el mismo diámetro y altura (Figura 3.7).

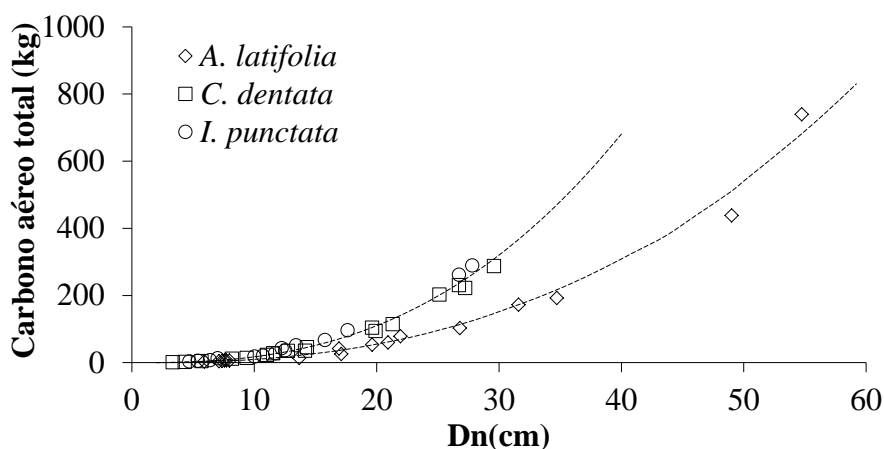


Figura 3.7. Modelo ajustado para estimar el carbono aéreo total (Ct) en los dos grupos de especies.

3.4.4 Estimación de biomasa y carbono a partir del volumen

El modelo ajustado para estimar la biomasa aérea total y carbono aéreo total a partir del volumen comercial presentaron buenos estadísticos de ajuste (Cuadro 3.7 y 3.8). Para estimar la Bt (kg) por árbol se proponen los siguientes modelos para los grupos de especies:

$$Bt_{(Grupo 1)} = -20.5087 + 1358.45(vol)$$

$$Bt_{(Grupo 2)} = -20.5087 + 998.58(vol)$$

Mientras que para estimar el Ct (kg) por árbol son los siguientes:

$$Ct_{(Grupo\ 1)} = -9.91 + 631.24(vol)$$

$$Ct_{(Grupo\ 2)} = -9.91 + 462.36(vol)$$

Como se puede observar en los valores de los parámetros de los modelos (Cuadro 3.7 y 3.8), estos nos proporcionan un factor de expansión de biomasa y de carbono variable directamente. Para el Grupo1 el FEB es de 1358.5 kg de peso seco de la biomasa aérea total por árbol y un FEC es de 631.25 de peso seco de carbono aéreo total por árbol por cada metro cubico del volumen del fuste comercial; mientras que los valores de FEB y FEC en el Grupo 2 son de 998.56 y 462.36 kgm^{-3} respectivamente. Las diferencias en los valores del FEB y FEC se observan en las Figuras 3.8 y 3.9.

Cuadro 3.7. Resultados de ajuste de la estimación de biomasa a partir del volumen comercial agrupando las especies.

Ecuación	Parámetros estimados				RMS [¶] (kg)	R^2_{Adj} [§]
	Símbolo	Valor	EE [†]	Pr > t		
$Bt = \varphi_0 + (\omega_0 + \omega_1 \cdot I_1)vol$	φ_0	-20.5087	12.45	0.1067	65.64	0.9504
	ω_0	1358.4539	74.62	<0.0001		
	ω_1	-359.8696	74.62	<0.0001		

[†]EE: error estándar de los parámetros; [¶]RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; [§] R^2_{Adj} coeficiente de determinación ajustado; φ_0, ω_0 parámetros de regresión; ω_1 parámetro de adicionalidad debido al Grupo 2.

Cuadro 3.8. Resultados de ajuste de la estimación del carbono a partir del volumen comercial agrupando las especies.

Ecuación	Parámetros estimados				RMS [¶] (kg)	R_{Adj}^2
	Símbolo	Valor	EE [†]	Pr > t		
$Bt = \gamma_0 + (\delta_0 + \delta_1 \cdot I_1)vol$	γ_0	-9.91	5.763	0.0924	30.36	0.9506
	δ_0	631.24	34.52	<0.0001		
	δ_1	-168.87	34.51	<0.0001		

[†]EE: error estándar de los parámetros; [¶]RMSE: raíz de los cuadrados medios del error; R_{Adj}^2 : coeficiente de determinación ajustado; γ_0, δ_0 , parámetros de regresión; δ_1 parámetro de adicionalidad debido al grupo 2.

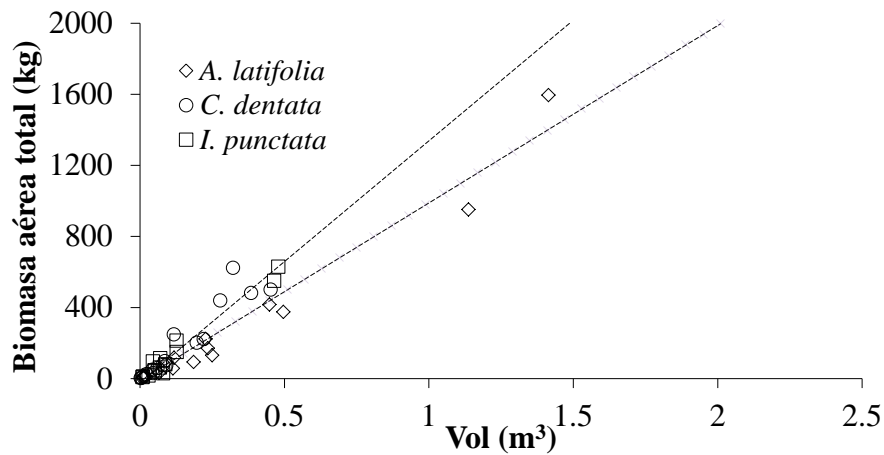


Figura 3.8. Estimación de la biomasa aérea total (Bt) a partir del volumen comercial (vol) en las tres especies arbóreas.

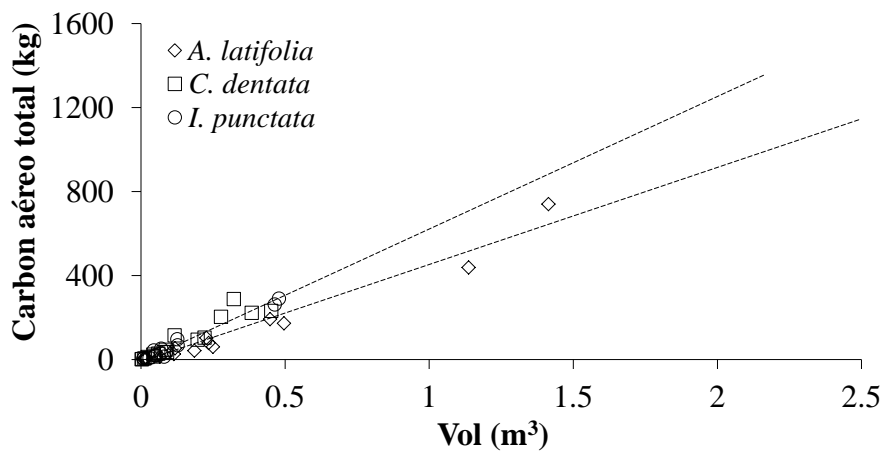


Figura 3.9. Estimación del carbono aéreo total (Ct) a partir del volumen comercial (vol) en las tres especies arbóreas.

Además, a partir de la relación del modelo de biomasa área total (Bt) y el volumen de comercial (vol) también es posible obtener una ecuación de factor de expansión variable (FEB), expresado de la siguiente forma:

$$FEB_{(Grupo1)} = \frac{Bt}{vol} = \frac{Exp^{-3.363} \times Dn^{2.480} \times H^{0.498}}{Exp^{-8.293} \times Dn^{2.123} \times H^{0.110}} = 138.50 \times Dn^{0.375} \times H^{0.387}$$

$$FEB_{(Grupo2)} = \frac{Bt}{vol} = \frac{Exp^{-3.363} \times Dn^{2.480} \times H^{0.498}}{Exp^{-8.293} \times Dn^{2.072} \times H^{0.110}} = 138.50 \times Dn^{0.199} \times H^{0.387}$$

De la misma manera, se puede obtener una ecuación de factor de expansión de carbono (FEC) con las ecuaciones de carbono aéreo total (Ct) y el volumen de comercial (vol), expresado de la siguiente forma:

$$FEC_{(Grupo1)} = \frac{Ct}{vol} = \frac{Exp^{-4.177} \times Dn^{2.487} \times H^{0.506}}{Exp^{-8.293} \times Dn^{2.123} \times H^{0.110}} = 61.35 \times Dn^{0.3638} \times H^{0.396}$$

$$FEC_{(Grupo2)} = \frac{Ct}{vol} = \frac{Exp^{-4.177} \times Dn^{2.275} \times H^{0.506}}{Exp^{-8.293} \times Dn^{2.072} \times H^{0.110}} = 61.35 \times Dn^{0.2038} \times H^{0.396}$$

Con las ecuaciones anteriores se pueden construir tablas de FEB y FEC para un determinado diámetro y altura total del árbol (Anexo 3.1), que al multiplicar el valor correspondiente de FEB y FEC por el volumen del árbol obtenemos la biomasa aérea total y carbono aéreo total respectivamente. Los FEB y FEC variables pueden resultar más precisos en las estimaciones de biomasa que los FEB y FEC constantes, porque toman en cuenta la variación en la alometría de los árboles (Jalkanen *et al.*, 2005). En los dos grupos de especies, los FEB y FEC incrementan con el tamaño del árbol (Figura 3.10), debido a que en las especies de árboles tropicales que crecen en espacios abiertos acumulan mayor biomasa en las ramas, es decir, la expansión de la copa es más rápida que la del fuste cuando el diámetro aumenta, por esta razón los valores de FEB y FEC se incrementan en los diámetros mayores.

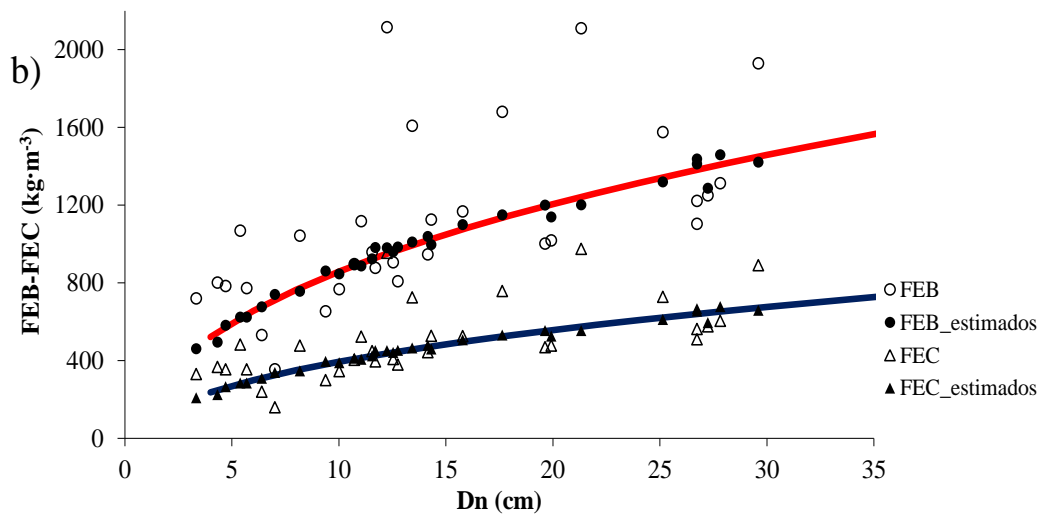
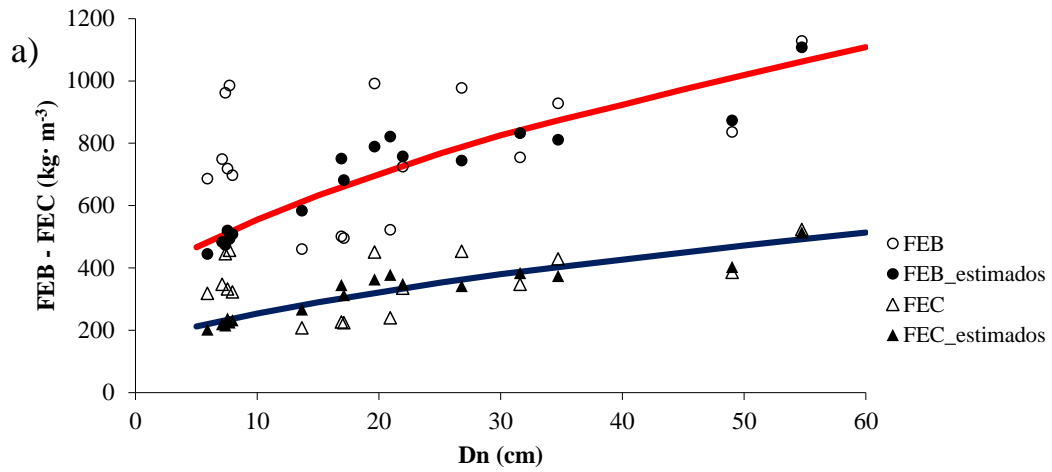


Figura 3.10. FEB y FEC ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) variables para los diferentes tamaños del árbol en a) Grupo 1 y b) Grupo 2.

3.5 CONCLUSIONES

La mayor concentración de carbono se encontró en las hojas y las ramas seguido del fuste en *C. dentata* e *I. punctata*, por lo contrario en *A. latifolia* los valores de las concentraciones fueron similares. La concentración promedio ponderada entre especies mostró diferencias significativas.

Al considerar las variaciones inter-específicas e intra-específicas de la concentración de carbono se mejora la precisión en las estimaciones del contenido de carbono en las especies bajo estudio.

Los factores de expansión de biomasa y factores de expansión de carbono variables son dependientes al diámetro y altura del árbol, de fácil aplicación a inventarios forestales. Los modelos propuestos son una herramienta práctica y precisa para la estimación de volumen comercial, biomasa y carbono, ya que incorporan el diámetro normal y la altura como variables explicativas.

3.6 LITERATURA CITADA

- Aalde, H., P. González, M. Gytarsky, T. Krug, W. A. Kurz, y S. Oleg. 2006. Tierras Forestales. 93:15-16.
- Bailey, R. L. 1995. Upper-stem volume from stem-analysis data and overlapping bolt method. Canadian J. Forest Res. 25:170-173.
- Basuki, T. M., P. E. van Laake, A.K. Skidmore, and Y. A. Hussin. 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. For. Ecol. Manage. 257:1684-1694.
- Bert, D., and F. Danjon. 2006. Carbon concentration variations in the roots, stem and crown of mature *Pinus pinaster* (Ait.). For. Ecol. Manage. 222:279-295.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper 134. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, pp. 55.
- Cairns, M. A., S. Brown, E. H. Helmer, and G. A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. Oecologia. 111:1-11.
- Cao, M., and F. I. Woodward. 1998 a. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. Global Change Biology 4: 185-198.

- Clutter, J.L., J.C. Forston, L.V. Pienaar, G.H. Brister, and R.L. Bailey. 1983. *Timber Management: a Quantitative Approach*. John Wiley and Sons. New York. 333p.
- Cramer, W., A. Bondeau, F.I. Woodward, I. C. Prentice, R. A. Betts, V. Brovkin, P. M. Cox, V. Fisher, J. A. Foley, A. D. Friend, C. Kucharik, M. R. Lomas, N. Ramankutty, S. Sitch, B. Smith, A. White and C. Young-Molling. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, 7(4): 357-373.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science (Washington)* 263(5144): 185-1991.
- Elias, M., and C. Potvin. 2003. Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. *Can. J. For. Res.* 33: 1039-1045.
- Figuroa-Navarro, C., J. D. Etchevers-Barra, A. Velázquez-Martínez, y M. Acosta-Mireles. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra Norte de Oaxaca. *Terra Latinoamericana* 23:57-64.
- Friedlingstein, P., L. Bopp, P. Ciais, J.L. Dufresne, L. Fairhead, H. LeTreut, P. Monfray and J. Orr. 2001. *Geophysical Research Letters*, 28(8): 1543-1546.
- Fukatsu, E., Y. Fukuda, M. Takahashi, and R. Nakada. 2008. Clonal variation of carbon content in wood of *Larix kaempferi* (Japanese larch). *J. Wood Sci.* 54:247-251.
- Fung I., C. B. Field, J. A. Berry, M. V. Thompson, J. T. Randerson, J. T. Randerson, C. M. Malmström, P. M. Vitousek, G. James Collatz, P. J. Sellers, D. A. Randall, A. S. Denning, F. Badeck and J. John. 1997. Carbon 13 exchanges between the atmosphere and biosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, 11: 507-533.
- Gayoso, J., y J. Guerra. 2005. Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *BOSQUE* 26(2): 33-38.
- Houghton, J. T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.). 1996. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change: contribution of working group I to the second assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Vol. 2. Cambridge University Press.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). 2007. Resumen Técnico. *In Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático*. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK y NY.

- Jalkanen A, R. Mäkipää, G. Stahl, A. Lehtonen, and H. Petersson. 2005. Estimation of the biomass stock of trees in Sweden: comparison of biomass equations and age-dependent biomass expansion factors. *Ann. For. Sci.* 62:845-851.
- Kattenberg, A., F. Giorgi, H. Grassl, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, R. J. Stouffer, T. Tokioka, A. J. Weaver, and T. M. L. Wigley. 1996. *Climate Change 95: The Science of Climate Change*, chapter 6. *Climate Models - Projections of Future Climate*, pp. 285–357, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, England.
- Lamlom, S.H., and R. A. Savidge. 2003. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass Bioenerg.* 25:381-388.
- Martin, A. R., and S. C. Thomas. 2011. A Reassessment of Carbon Content in Tropical Trees. *PLoS ONE* 6(8): e23533.
- Návar-Cháidez, J. J. 2009. Allometric equations and expansion factors for tropical dry trees of eastern Sinaloa, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10:45-52.
- R Development Core Team (2011). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <<http://www.R-project.org/>>.
- Silva-Arredondo, F. M., and J.J. Návar-Cháidez. 2009. Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del Norte de Durango, México. *Rev. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* 15(2): 155-160.
- Silva-Arredondo, F. M., and J.J. Návar-Cháidez. 2010. Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del Norte de Durango, México. *Rev. Mex. Cien. For.* 1(1): 55-62.
- Somogyi, Z., E. Cienciala, R. Mäkipää, P. Muukkonen, A. Lehtonen, P. Weiss. 2007. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *Eur J Forest Res* 126:197-207.
- Watson, M.A. y B.B. Casper. 1984. Morphogenetic constraints on patterns of carbon distribution in plants. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 15: 233-258.
- Yerena, J. I., J. Jiménez P. O. A. Aguirre C., E. J. Treviño G. y E. Alanís R. 2012. Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del Noreste de México. *Rev. Mex. Cien. For.* 3(13): 49-56.
- Zhang, Q., Ch. Wang., X. Wang, and X. Quan. 2009. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. *For. Ecol. Manage.* 258:722–727.

CAPITULO IV

4.1 CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten proponer una metodología para desarrollar modelos para estimar biomasa aérea total y un sistema de partición de biomasa en tres especies tropicales del municipio de Pluma Hidalgo, Oaxaca. Así mismo para estimar el volumen y el carbono aéreo se desarrollaron los modelos correspondientes. Es importante destacar, que las ecuaciones propuestas son una herramienta práctica para su uso en campo, debido a que sus variables independientes son diámetro normal y la altura total del árbol. Para mejorar las estimaciones del contenido de carbono en las especies bajo estudio es necesario considerar las variaciones inter-específicas e intra-específicas en la concentración de carbono.

4.2 RECOMENDACIONES GENERALES

- Validar los modelos propuestos para estimación de volumen, biomasa y carbono para una muestra independiente a la ya utilizada en este trabajo.
- Aumentar el tamaño de muestra incluyendo árboles con diámetros mayores a 30 cm y un mayor número de especies de árboles, incluyendo sus componentes aéreos y subterráneos, con ello lograr definir un mayor espectro de predicción para volumen, biomasa y carbono.
- Para ampliar los resultados obtenidos en las diferencias de la concentración de carbono, se sugiere obtener más muestras de los diferentes tejidos de los componentes aéreos y subterráneos del árbol, considerando además la albura y el duramen y realizar las comparaciones correspondientes.

ANEXOS

2.1 Índice de Valor de Importancia (IVI) para las especies presentes en la zona de estudio.

Nombre científico	Nombre común	Densidad relativa	Área basal relativa	Frecuencia relativa	IVI
<i>Alchornea latifolia</i> Sw.	Palo mujer	18.421	23.379	10.502	52.303
<i>Inga punctata</i> Willd.	Cuil delgado	7.656	2.998	6.849	17.503
<i>Cupania dentata</i> DC.	Huanchal	6.459	3.161	5.936	15.556
	Palo petróleo	5.502	3.681	5.936	15.119
<i>Ficus</i> sp.	Matapalo	1.914	11.096	1.826	14.836
	Higo	2.153	9.829	2.740	14.722
<i>Prunus serotina</i> Ehrh.	Capulín	1.914	5.427	2.283	9.624
<i>Ocotea atacta</i> Lorea-Hern.	Aguacatillo	2.153	2.842	3.653	8.648
<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Sangualico	2.392	1.189	4.110	7.691
<i>Clethra</i> sp.	Chamisillo	5.742	0.820	0.913	7.475
<i>Inga paterno</i> Harms	Cuiloso	2.871	1.933	2.283	7.087
<i>Persea</i> sp.	Aguacate	2.392	2.206	2.283	6.881
<i>Pterocarpus acapulcensis</i> Rose	Grado costeño	2.392	1.267	3.196	6.856
<i>Homalium trichostemon</i> S.F. Blake	Palo piedra	1.196	3.359	1.826	6.381
	Palo mazo	1.914	2.037	1.826	5.777
	Coralillo	0.957	1.932	1.826	4.716
<i>Saurauia serrata</i> DC.	Mamellito	1.675	0.264	2.740	4.679
<i>Cecropia obtusifolia</i> Bertol.	Guarumbo	1.435	1.573	1.370	4.378
	Juan diego	0.957	1.695	1.370	4.022
<i>Diphysa robinoides</i> Benth.	Cuachupil	1.914	0.412	1.370	3.695
<i>Lonchocarpus guatemalensis</i> Benth.	Palo gusano	1.675	0.164	1.826	3.665
<i>Abutilon purpusii</i> Standl.	Yaco	0.957	1.290	1.370	3.617
<i>Cedrela odorata</i> L.	Cedro rojo	1.914	0.284	1.370	3.568
	Agua piedra	1.914	1.167	0.457	3.537
	Zapote negro	0.957	1.586	0.913	3.456
	Rabo iguana	0.957	0.997	1.370	3.324
	Leche amarilla	0.957	0.458	1.826	3.242
	Cuil de piedra	0.718	0.914	1.370	3.002
<i>Calycophyllum candidissimum</i> (Vahl) DC.	Camaron	0.478	1.218	0.913	2.610
	Escobillo	0.478	1.206	0.913	2.598
<i>Cupania glabra</i> Sw.	Palo tejón	0.957	0.226	1.370	2.553
	Anona	0.478	1.096	0.913	2.488
	Annica	1.675	0.253	0.457	2.384
Cocoloba sp /Licania arborea	Carnero	0.478	0.947	0.913	2.339
	Agua aguatoso	0.478	0.940	0.913	2.332

Bursera simaruba

Garbanso	0.718	0.106	1.370	2.193
Cuil cuadrado	0.957	0.111	0.913	1.981
Mulato	0.478	0.558	0.913	1.950
Macuil	0.239	1.248	0.457	1.944
Caulote	0.718	0.264	0.913	1.895
Llaco de piedra	0.957	0.467	0.457	1.881
Naranjal	0.718	0.177	0.913	1.808
Cola pava	0.718	0.104	0.913	1.735
Guanabo	0.718	0.089	0.913	1.719
Chachalaco	0.718	0.073	0.913	1.704
Palo de ropa	0.478	0.072	0.913	1.464
Huaje verde	0.478	0.053	0.913	1.445
Mango	0.239	0.586	0.457	1.282
Palo naba	0.239	0.580	0.457	1.276
Cucharillo	0.239	0.436	0.457	1.132
Hierba blanca	0.478	0.110	0.457	1.045
Palo gallina	0.478	0.106	0.457	1.041
Cuasia	0.478	0.063	0.457	0.998
Zorrillo	0.478	0.055	0.457	0.990
Llagozan	0.239	0.284	0.457	0.980
Cuilocho	0.239	0.145	0.457	0.841
Cuil de cuero	0.239	0.126	0.457	0.822
Floripundio	0.239	0.109	0.457	0.805
Ciruelo	0.239	0.093	0.457	0.789
Llaco de cuero	0.239	0.041	0.457	0.737
San jose	0.239	0.041	0.457	0.737
Huaje	0.239	0.023	0.457	0.719
Cacao	0.239	0.019	0.457	0.715
Palo cano	0.239	0.014	0.457	0.710
<hr/>				
64	100	100	100	300

3.1 Factores de expansión de biomasa (FEB) y Factores de expansión de carbono variables

FEB variables para el Grupo 1 (*C. dentata* e *I. punctata*)

	Altura total (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
5	459.71	601.50	703.93	787.01	858.16	921.04	977.78	1029.75	1077.88	1122.84
10	589.01	770.68	901.92	1008.38	1099.53	1180.10	1252.80	1319.39	1381.06	1438.66
15	680.91	890.92	1042.64	1165.71	1271.08	1364.22	1448.27	1525.24	1596.53	1663.12
20	754.68	987.45	1155.60	1292.00	1408.80	1512.02	1605.18	1690.50	1769.51	1843.32
25	817.36	1069.46	1251.59	1399.32	1525.81	1637.61	1738.50	1830.91	1916.49	1996.42
30	872.43	1141.51	1335.90	1493.58	1628.60	1747.93	1855.62	1954.25	2045.59	2130.91
35	921.86	1206.19	1411.60	1578.22	1720.89	1846.98	1960.77	2064.99	2161.51	2251.67
40	966.95	1265.18	1480.64	1655.41	1805.05	1937.31	2056.66	2165.98	2267.22	2361.78
45	1008.54	1319.61	1544.33	1726.61	1882.70	2020.64	2145.13	2259.15	2364.75	2463.38
50	1047.26	1370.27	1603.62	1792.90	1954.98	2098.22	2227.49	2345.89	2455.54	2557.95
55	1083.57	1417.77	1659.21	1855.06	2022.75	2170.96	2304.71	2427.22	2540.66	2646.63
60	1117.81	1462.58	1711.65	1913.68	2086.68	2239.57	2377.55	2503.92	2620.95	2730.27
65	1150.27	1505.04	1761.34	1969.25	2147.26	2304.60	2446.58	2576.62	2697.05	2809.54
70	1181.16	1545.46	1808.64	2022.13	2204.92	2366.48	2512.28	2645.81	2769.48	2884.99

FEC variables para el Grupo 1 (*C. dentata* e *I. punctata*)

	Altura total (m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
5	208.51	274.42	322.25	361.16	394.55	424.10	450.82	475.31	498.02	519.25
10	268.33	353.15	414.70	464.77	507.74	545.78	580.15	611.67	640.90	668.22
15	311.00	409.29	480.63	538.66	588.46	632.55	672.39	708.92	742.79	774.46
20	345.32	454.47	533.67	598.11	653.40	702.35	746.59	787.16	824.77	859.93
25	374.53	492.91	578.82	648.70	708.67	761.77	809.75	853.74	894.53	932.67
30	400.22	526.72	618.52	693.20	757.29	814.02	865.29	912.31	955.89	996.65
35	423.31	557.11	654.21	733.20	800.98	860.99	915.22	964.94	1011.05	1054.15
40	444.39	584.85	686.78	769.70	840.86	903.86	960.78	1012.99	1061.39	1106.64
45	463.85	610.46	716.86	803.41	877.68	943.44	1002.86	1057.35	1107.87	1155.10
50	481.98	634.32	744.87	834.81	911.99	980.31	1042.06	1098.68	1151.17	1200.24
55	498.99	656.70	771.16	864.27	944.17	1014.91	1078.83	1137.45	1191.79	1242.60
60	515.04	677.83	795.97	892.08	974.55	1047.56	1113.54	1174.04	1230.13	1282.58
65	530.26	697.86	819.49	918.44	1003.35	1078.52	1146.45	1208.74	1266.49	1320.48
70	544.76	716.94	841.89	943.55	1030.77	1108.00	1177.78	1241.78	1301.11	1356.58

FEB variables para el Grupo 2 (*A. latifolia*)

		Altura total (m)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Diámetro normal (cm)	5	356.34	466.25	545.65	610.06	665.21	713.95	757.93	798.22	835.53	870.38
	10	409.14	535.33	626.49	700.44	763.76	819.72	870.23	916.48	959.32	999.33
	15	443.58	580.39	679.23	759.40	828.05	888.72	943.48	993.63	1040.07	1083.45
	20	469.76	614.65	719.32	804.22	876.92	941.18	999.16	1052.27	1101.45	1147.39
	25	491.12	642.60	752.03	840.80	916.81	983.98	1044.60	1100.13	1151.55	1199.58
	30	509.30	666.38	779.86	871.92	950.74	1020.40	1083.26	1140.84	1194.17	1243.97
	35	525.19	687.18	804.20	899.12	980.40	1052.24	1117.06	1176.44	1231.43	1282.79
	40	539.36	705.71	825.89	923.38	1006.85	1080.62	1147.20	1208.17	1264.64	1317.39
	45	552.17	722.48	845.51	945.31	1030.76	1106.29	1174.45	1236.87	1294.68	1348.68
	50	563.89	737.81	863.45	965.37	1052.64	1129.77	1199.37	1263.12	1322.16	1377.31
	55	574.70	751.96	880.01	983.89	1072.83	1151.44	1222.38	1287.35	1347.52	1403.72
	60	584.76	765.12	895.41	1001.10	1091.60	1171.58	1243.76	1309.87	1371.09	1428.28
	65	594.16	777.42	909.81	1017.20	1109.15	1190.42	1263.76	1330.94	1393.14	1451.25
70	603.00	788.99	923.35	1032.34	1125.66	1208.14	1282.57	1350.74	1413.88	1472.85	

FEC variables para el Grupo 2 (*A. latifolia*)

		Altura total (m)									
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Diámetro normal (cm)	5	161.15	212.09	249.06	279.13	304.93	327.78	348.42	367.36	384.91	401.32
	10	185.61	244.27	286.85	321.48	351.20	377.51	401.29	423.10	443.31	462.21
	15	201.60	265.32	311.56	349.18	381.46	410.04	435.86	459.55	481.50	502.03
	20	213.77	281.34	330.37	370.27	404.49	434.80	462.18	487.30	510.58	532.35
	25	223.72	294.43	345.75	387.49	423.32	455.03	483.69	509.97	534.34	557.12
	30	232.19	305.58	358.84	402.16	439.34	472.26	502.00	529.28	554.56	578.21
	35	239.60	315.33	370.29	415.00	453.36	487.33	518.02	546.17	572.26	596.66
	40	246.21	324.03	380.50	426.45	465.87	500.77	532.31	561.24	588.05	613.12
	45	252.19	331.90	389.75	436.81	477.19	512.94	545.25	574.87	602.34	628.02
	50	257.67	339.11	398.21	446.29	487.55	524.07	557.08	587.35	615.41	641.65
	55	262.72	345.76	406.02	455.04	497.11	534.35	568.01	598.87	627.49	654.24
	60	267.42	351.94	413.29	463.19	506.01	543.91	578.17	609.59	638.71	665.94
	65	271.82	357.73	420.08	470.80	514.33	552.86	587.68	619.61	649.22	676.90
70	275.96	363.18	426.48	477.97	522.16	561.27	596.63	629.04	659.10	687.20	