



Almacenamiento del carbono en bosques con manejo forestal  
sostenible en la Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala

**WILLIAM ESTUARDO ARREAGA GRAMAJO**

---

CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN

ESCUELA DE POSGRADO



//  
ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN BOSQUES CON MANEJO FORESTAL  
SOSTENIBLE EN LA RESERVA DE BIOSFERA MAYA, PETÉN, GUATEMALA

Por

WILLIAM ESTUARDO ARREAGA GRAMAJO

**CATIE**

Turrialba, Costa Rica 2002

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA  
PROGRAMA DE ENSEÑANZA PARA EL DESARROLLO Y LA CONSERVACIÓN  
ESCUELA DE POSGRADO**

**ALMACENAMIENTO DEL CARBONO EN BOSQUES CON MANEJO FORESTAL  
SOSTENIBLE EN LA RESERVA DE BIOSFERA MAYA, PETÉN, GUATEMALA**

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado, Programa de Educación para el Desarrollo y la Conservación del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza como requisito parcial para optar al grado de

*Magister Scientiae*

Por

**WILLIAM ESTUARDO ARREAGA GRAMAJO**

Turrialba, Costa Rica 2002

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

*MAGISTER SCIENTIAE*

**FIRMANTES:**



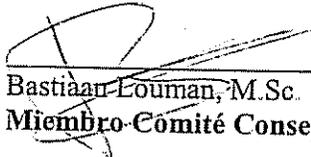
---

Markku Kanninen, Ph.D.  
**Consejero Principal**



---

José Joaquín Campos, Ph.D.  
**Miembro Comité Consejero**



---

Bastiaan Louman, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**

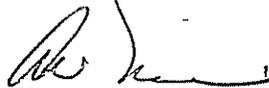
---

Milena Segura, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



---

Tangaxhuan Llanderal, M.Sc.  
**Miembro Comité Consejero**



---

Ali Moslemi, Ph.D.  
**Director Programa de Educación y  
Decano de la Escuela de Posgrado**



---

William Estuardo Arreaga Gramajo  
**Candidato**

## **DEDICATORIA**

**A DIOS**  
bondad infinita

**A mi mama**  
Reflejo de Dios en la Tierra

**A mi padre**  
Mi viejo

**A mis hermanos**  
Vivi, Wendy y Dany  
(mis "manitos")

**A mi novia**  
Ana Elisa Dávila

**A Francisco Pacheco**  
Mi respeto y admiración sirvan de homenaje a su memoria

## AGRADECIMIENTOS

A Markku Kanninen, Ph.D. consejero principal de la investigación: su paciencia, empeño y confianza fueron la base del trabajo de tesis realizado.

Al proyecto Cambio de Uso de la Tierra y Flujos de Carbono en Centroamérica (LUCCAM), CATIE-Universidad de Helsinki por el apoyo financiero en todas las fases del proyecto de tesis.

A Milena Segura M.Sc, por su paciencia y apoyo en campo, análisis y revisiones del documento.

A Bastiaan Louman M.Sc, Tangaxuhán Llanderal M.Sc., y José Joaquín Campos Ph.D. agradezco sus consejos y tiempo invertido en la revisión y evaluación del trabajo de investigación.

A la Fundación Naturaleza para la Vida ( N P V ), institución pionera en la investigación forestal en bosques tropicales de la Reserva de Biosfera Maya; en especial al Ing. For. Gustavo Pinelo por su gestión en el apoyo logístico.

A las sociedades civiles "Impulsores Suchitecos" y "Organización, Manejo y Conservación" por su desmedido interés en el apoyo a la investigación forestal en "Suchitán" y "Uaxaca", respectivamente.

A Don Francisco Pacheco (QEPD) por concederme el privilegio de ser su alumno y amigo a la vez.

A Fernando Carrera M.Sc., principal precursor de la reforestación de guatemaltecos en CATIE.

A mi gran amigo y colega, Edgar Bámaca, M.Sc., mejor promedio de la promoción 2001.

A mis *pasieros* de siempre: Giovanni Cárdenas, Edgar Bámaca, Audino Melgar y Abby Guerra.

A mis compañeros y amigos latinoamericanos en CATIE: la Clau, el Bámaca, el Gio, Lucho, la Fabi, Angrand, la Vero, los Jorges, Byron Milián, Pablito, la Bea , Karlita, Ana María y Román Ospina por enseñarme parte de su cultura.

A la tradicional mejenga en la escuelita, principal actividad de relajación en CATIE y de paso, ensayo para el bicampeonato.

"Pierde una sola hora a la mañana, y todo el día andarás a la caza de ella".  
Archild Whateley.

## INDICE DE CONTENIDOS

	Pag.
<b>1. RESUMEN .....</b>	<b>X</b>
<b>2. INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA .....	1
2.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA .....	2
2.3 OBJETIVOS .....	3
2.3.1 Objetivo general .....	3
2.3.2 Objetivos específicos .....	3
2.4 HIPÓTESIS .....	4
<b>3. REVISION DE LITERATURA .....</b>	<b>5</b>
3.1 EL CAMBIO CLIMÁTICO, ANTECEDENTES E IMPORTANCIA .....	5
3.1.1 La convención sobre cambio climático: enfrentando el problema .....	6
3.2 EL PAPEL DE LOS ECOSISTEMAS ARBÓREOS EN EL CAMBIO CLIMÁTICO .....	7
3.3 METODOLOGÍAS PARA LA CUANTIFICACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUES NATURALES TROPICALES .....	10
3.3.1 Estimación de biomasa aérea y carbono .....	11
3.3.1.1 Modelos alométricos para la predicción de variables de biomasa y carbono .....	11
3.3.1.2 Inventarios forestales .....	12
3.3.1.3 Factores de ajustes en las estimaciones de biomasa aérea total y carbono .....	13
3.3.2 Estimación del carbono en hojarasca .....	14
3.3.3 Estimación del carbono almacenado en el suelo .....	15
<b>4. MATERIALES Y METODOS .....</b>	<b>17</b>
4.1 ESQUEMA GENERAL .....	17
4.2 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	18
4.3 SELECCIÓN DE ÁREAS DE ESTUDIO .....	19
4.4 DISEÑO DE MUESTREO Y DISTRIBUCIÓN DE PARCELAS .....	20
4.5 ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA TOTAL .....	20
4.6 HOJARASCA Y SUELO .....	24
4.7 RECUPERACIÓN DE LOS BOSQUES INTERVENIDOS EN TÉRMINOS DE ALMACENAMIENTO DE CARBONO .....	25
4.8 ANÁLISIS DE LABORATORIO Y GABINETE .....	27
4.8.1 Estimación de materia seca en las submuestras .....	27
4.8.2 Estimación de la gravedad específica de árboles aprovechables .....	27
4.8.3 Estimación de biomasa aérea total y carbono .....	28
4.8.4 Generación de ecuaciones alométricas .....	29
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSION .....</b>	<b>32</b>
5.1 ANÁLISIS DE LA ABUNDANCIA Y COMPOSICIÓN DEL BOSQUE .....	32
5.2 ANÁLISIS DE LAS VARIABLES DASOMÉTRICAS DEL BOSQUE .....	34
5.2.1 Abundancia por hectárea .....	35
5.2.2 Area basal por hectárea .....	36
5.2.3 Volumen por hectárea .....	36
5.3 ESTIMACIÓN DE GRAVEDAD ESPECÍFICA Y FRACCIÓN DE CARBONO .....	37
5.3.1 Gravedad específica .....	37
5.3.2 Fracción de carbono .....	39

	Pag.
5.4 ESTIMACIÓN DE BIOMASA AÉREA TOTAL Y CARBONO EN LA VEGETACIÓN .....	40
5.4.1 Ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa aérea total y carbono .....	43
5.4.1.1 Ramas no comerciales .....	43
5.4.1.2 Fustales aprovechables .....	45
5.4.1.3 Fustales en general .....	46
5.4.1.4 Regeneración natural establecida .....	47
5.4.1.5 Vegetación en general .....	48
5.4.2 Biomasa aérea total y carbono en el bosque .....	51
5.4.3 Estimación de biomasa y carbono en hojarasca y suelo .....	54
5.5 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ESTIMACIONES DE BIOMASA EN ÁREAS DE APROVECHAMIENTO ANTERIOR .....	55
5.5.1 Análisis del contenido de carbono en áreas intervenidas .....	56
5.5.1.1 Claros de tumba .....	56
5.5.1.2 Caminos de arrastre .....	59
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>62</b>
<b>7. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>64</b>
<b>8. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>65</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>70</b>

## INDICE DE CUADROS

	Pag
Cuadro 1. Resumen general de la metodología, análisis y resultados esperados en la investigación .....	17
Cuadro 2. Resumen analítico de las principales características biofísicas de las unidades de manejo forestal .....	18
Cuadro 3. Planes operativos anuales como población meta para el estudio .....	19
Cuadro 4. Número de individuos por clase diamétrica utilizados como submuestra .....	23
Cuadro 5. Información general del muestreo de la vegetación (n=18 parcelas) en el cuadrante "C", POA 2002 en la unidad de manejo "Río Chanchich" .....	32
Cuadro 6. Resumen de variables dasométricas de individuos que conforman la submuestra .....	34
Cuadro 7. Estimaciones estadísticas de las variables dasométricas por hectárea de la vegetación en la unidad de manejo "Río Chanchich" .....	35
Cuadro 8. Variables dasométricas de la vegetación para dos unidades de manejo .....	36
Cuadro 9. Resultados de gravedad específica por especie en las unidades de manejo .....	37
Cuadro 10. Resultados de gravedad específica promedio según órgano .....	38
Cuadro 11. Gravedad específica para árboles de bosques tropicales, varias fuentes .....	38
Cuadro 12. Resultados de fracción de carbono de la vegetación en las unidades de manejo .....	39
Cuadro 13. Resultados de biomasa total (t) por componentes de los árboles muestreados .....	40
Cuadro 14. Factor de expansión de biomasa por categoría de vegetación .....	43
Cuadro 15. Ecuación de regresión para la estimación de biomasa de ramas no comerciales .....	44
Cuadro 16. Ecuaciones de regresión alternativas para la estimación de la biomasa de ramas no comerciales .....	45
Cuadro 17. Ecuaciones de regresión propuestas para la estimación de biomasa aérea total de fustales aprovechables .....	46
Cuadro 18. Ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa total de fustales .....	47
Cuadro 19. Ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa total de la regeneración natural establecida .....	48
Cuadro 20. Ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa total de la vegetación general .....	48
Cuadro 21. Comparación de ecuaciones de regresión de otros autores .....	49

	Pag.
Cuadro 22. Resultados de biomasa aérea total por categoría de vegetación en la unidad de manejo "Río Chanchich" .....	51
Cuadro 23. Biomasa total estimada (t/ha) reportada por varios autores en el trópico americano .....	53
Cuadro 24. Area de los claros de tumba para dos unidades de manejo forestal .....	56
Cuadro 25. Carbono almacenado en la vegetación y suelo de bosques intervenidos .....	58
Cuadro 26. Resumen general de biomasa aérea total y carbono almacenado en las áreas bajo estudio ..	61

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Parcela de muestreo para el levantamiento de la información dasométrica y biomasa .....	21
Figura 2. Estructura de "espina de pescado" para la estimación de claros de tumba .....	25
Figura 3. Esquema de la parcela de muestreo para el estudio de la regeneración natural establecida en claros de tumba .....	26
Figura 4. Esquema de la parcela de muestreo para el estudio de la regeneración natural establecida en caminos de arrastre .....	26
Figura 5. Distribución de la abundancia (%) de especies dominantes en la vegetación según muestreo general .....	33
Figura 6. Relación de la biomasa total por árbol y el Dap de los árboles muestreados .....	40
Figura 7. Relación de la biomasa de fuste y biomasa de ramas de los árboles muestreados .....	41
Figura 8. Relación del Factor de Expansión de Biomasa con el Dap en (a) brinzales, (b) latizales, (c) fustales y (d) vegetación en general .....	42
Figura 9. Grado de correlación entre variables en la estimación de biomasa de ramas no comerciales ....	44
Figura 10. Simulaciones de biomasa real y estimada con modelos de (a) Brown <i>et al</i> (1989) que incluye Dap; (b) Brown <i>et al</i> (1989) que incluye Dap y altura; (c) Segura y Kanninen (2001); Ecuación 21 generada en esta investigación .....	50
Figura 11. Biomasa aérea total (t/ha) para dos bases de datos .....	52
Figura 12. Relación entre el total de carbono orgánico del suelo y el carbono superficial en el bosque ....	54
Figura 13. Distribución del carbono almacenado en la regeneración natural de claros de tumba .....	57
Figura 14. Distribución del carbono almacenado en la regeneración natural de caminos de arrastre .....	60

Arreaga Gramajo, WE. 2002. Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal sostenible en la Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala. Tesis Mag. Sc. CATIE. Turrialba, CR. 73 p.

Palabras claves: modelos alométricos, biomasa aérea total, gravedad específica, fracción de carbono, regeneración natural, grupos ecológicos, manejo forestal, Reserva de Biosfera Maya.

## 1. RESUMEN

El objetivo de la investigación fue estimar la biomasa aérea total y el contenido de carbono en la vegetación, hojarasca y suelo de las unidades de manejo "Río Chanchich" y "Uaxactún". Además evaluar la capacidad de recuperación del carbono en claros y caminos.

Se realizaron muestreos sistemáticos en parcelas de 0.025 ha registrando información dasométrica de toda la vegetación. En total, se encontraron 96 especies distribuidas en todas las clases diamétricas.

Se utilizaron técnicas destructivas e indirectas para estimar la biomasa. Paralelamente, se obtuvieron muestras para estimar gravedad específica (GE), fracción de carbono y se estimó el factor de expansión de biomasa.

Los análisis de GE no mostraron variabilidad estadística entre órgano, especie y unidades de manejo habiéndose reportado valores mayores para "Río Chanchich". La fracción de carbono resultó en 0.50.

Los valores de factor de expansión de biomasa (FEB) encontrados para "Uaxactún" fueron mayores que para "Río Chanchich" en fustales; el valor promedio fue de 1.60.

Se generaron modelos alométricos para estimar biomasa aérea total. Todos los modelos fueron de tipo logarítmico y se ajustan con una precisión aceptable a los datos reales de biomasa.

Se utilizó el criterio de Furnival (1964) para la elección del mejor modelo para la vegetación en general ( $n=300$ ), además del coeficiente de determinación ajustado, cuadrado medio del error y otras medidas de precisión.

Con la aplicación de estos modelos se obtuvo un estimado de 209.64 t/ha de biomasa aérea total, el cual supera al dato reportado por Aguilar (2002) para la unidad de manejo "Uaxactún". También se constató que la vegetación menor contribuye con 7% al total de biomasa.

En la hojarasca de "Río Chanchich" se almacena 1.67 t C/ha y en la unidad de manejo "Uaxactún" 2.25 t C/ha. En el suelo de "Río Chanchich", se tiene una variación promedio de 49 a 213 t C/ha según el rango de profundidad analizado.

La unidad de manejo "Río Chanchich" ha recuperado en mejor forma los contenidos de carbono en la vegetación de clases diamétricas inferiores, hojarasca y suelo en áreas impactadas de claros de tumba y vías de arrastre. Sin embargo, se requiere incluir la variable tiempo para concluir en forma más precisa.

Arreaga Gramajo, WE. 2002. Carbon storage in forests with sustainable management in the Reserva de Biósfera Maya, Petén, Guatemala. Thesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, CR. 73 p.

Key Words: Allometric models, total aboveground biomass, fraction of carbon, natural regeneration, forest management, Reserva de Biósfera Maya.

## SUMMARY

This research main objective was to estimate the total aboveground biomass and carbon contents in the vegetation, fallen leaves, and soil of the management units "Río Chanchich" and Uaxactún. In addition, carbon recuperation capacity in glade areas and rows were estimated.

A systematic sampling in plots of 0.025 ha were done in order to register information from vegetation. A total of 96 species distributed in all diametric classes were found.

The biomass was estimated by destructive and indirect techniques. At the same time, samplings for wood density (GE) and fraction of carbon were estimated. The biomass expansion factor was also obtained.

The analysis of GE did not show variability among organ, species, and management units; but high values were reported for "Río Chanchich". The fraction of carbon was 0.50.

The biomass expansion factors (FEB) values for timber were greater for Uaxactún than for Río Chanchich. The mean value was 1.60.

The total aboveground biomass was estimated with allometric models. All the models were logarithmic and were adjusted with an acceptable precision to the biomass real data.

The best-fit model of the general vegetation (n=300) was chosen with Furnival (1964) criteria. In addition, the fix-adjusted coefficient, mean square error, and other precision measures were used.

A total aboveground biomass of 209.64 t/ha was estimated with these models. This estimation is greater than the reported by Aguilar (2,002) for the management unit "Uaxactún". It was also shown that minor vegetation contributes with 7% of total biomass.

In the fallen leaves of Río Chanchich are stored 1.67 t C/ha while in Uaxactún was estimated in 2.25 t C/ha. In Río Chanchich soil a mean variation between 49 to 213 t C/ha was found depending upon the analyzed rank depth.

Río Chanchich reports a better recuperation of the carbon contents found in the vegetation of inferior diametric classes, fallen leaves, and soil in glade areas and dragging rows. However, more information is required to conclude in a more accurate form.

## 2. INTRODUCCION

### 2.1 Caracterización del problema

Hoy en día, el cambio climático se ha constituido una preocupación mundial en materia de ambiente y desarrollo. Tanto es así que los países mayormente emisores de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, metano, óxido nitroso, entre otros) han convenido en reducirlas a niveles socialmente aceptables (Beaumont 1999). La preocupación radica en el calentamiento inminente de la superficie de la Tierra, principalmente por que a causa de la deforestación, la producción y consumo de combustibles fósiles (Dixon et al. 1994, Malhi y Grace 2000), el balance natural del ecosistema en términos de estabilidad climática se ha roto provocando enormes pérdidas de biodiversidad y cultivos.

En lo referente a deforestación, se ha estimado que a escala mundial se liberan  $1.6 \pm 1.0$  Pg de C a la atmósfera. El panorama se complica cuando a esto se le agrega lo liberado por la quema de combustibles fósiles como el petróleo ( $5.5 \pm 0.5$  Pg de C) (Kanninen 2000) puesto que para efectos de reducir estas emisiones, se afectarían los procesos económicos de las sociedades desde inversiones monetarias hasta el desarrollo de los países dependientes directos de la madera como medio de vida o del suelo como sustrato para cultivo (IPCC 2001).

En tal sentido, la respuesta al cambio climático se viene enfocando desde el punto de vista de la adaptación y de la mitigación (Ciesla 1995). Sin embargo, considerando que las actividades de adaptación representan costos elevados, se prefiere la implementación de actividades que mitiguen los impactos del efecto invernadero, proceso fundamental que promueve el cambio climático.

Entre estas actividades se aprovecha el potencial de los bosques para captar, fijar y almacenar el carbono de la atmósfera principalmente mediante su conservación y manejo forestal sostenible (Cairns y Meganck 1994, Brown 1995).

Este es el caso de los bosques de la Reserva de Biosfera Maya en Petén, Guatemala quienes presentan un potencial alto para tales efectos pero no se tienen bases teóricas que lo respalden. Únicamente se tiene conocimiento empírico de que el sistema de concesiones forestales comunitarias podrían representar una salida para incrementar el valor de los bosques en términos de estabilización del cambio climático.

Considerándose su importancia, la presente investigación presenta una serie de elementos técnicos y científicos para la estimación de la biomasa aérea total y el carbono almacenado a través de la generación de modelos alométricos; y se complementa la investigación con el análisis de los contenidos de carbono en la hojarasca y el suelo de dos unidades de manejo: "Río Chanchich" en Melchor de Mencos y "Uaxactún" en Flores; ambos en Petén, Guatemala.

Además, se presenta un análisis de los contenidos de carbono en la regeneración natural establecida, hojarasca y suelo en áreas de antigua intervención (claros de tumba y caminos de arrastre).

## **2.2 Justificación e importancia**

Según las estimaciones de la FAO (2001) para el año 2000, los bosques del mundo cubren una superficie de 3.87 Gha. De aquí, aproximadamente un 50% lo constituyen los bosques tropicales (Kanninen 2000).

Atendiendo al área cubierta y al papel que desempeñan los bosques bajo manejo forestal en Petén sobre ciclo del carbono, se considera que podrían ayudar a compensar las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera mediante el proceso de fijación y almacenamiento a través de la fotosíntesis.

Una estimación de la biomasa aérea total de los bosques tropicales de la RBM, será una aproximación real de la cantidad de carbono almacenado en sus diferentes componentes: hojarasca, fustes, ramas, hojas y suelo. Con esto, se definirá un proceso atractivo para agregar valor al bosque que muestre a las comunidades que el manejo forestal es la vía más eficiente para la reducción de gases contaminantes y el aumento de sus ganancias netas mediante el aprovechamiento racional.

Al mismo tiempo, los resultados generados pueden servir de base para la generación de proyectos de pago por servicios ambientales, proceso incipiente en Guatemala.

## **2.3 OBJETIVOS**

### **2.3.1 Objetivo general**

Estimar el potencial de almacenamiento de carbono en los bosques bajo manejo forestal sostenible de la Reserva de Biosfera Maya, Petén, Guatemala.

### **2.3.2 Objetivos específicos**

- a) Desarrollar modelos alométricos para estimar la biomasa aérea total en los bosques manejados bajo estudio.
- b) Cuantificar el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea total y bajo el suelo de los bosques con manejo forestal mejorado en "Río Chanchich" y "Uaxactún".
- c) Evaluar la capacidad de recuperación del bosque de las unidades de manejo después del aprovechamiento en términos de almacenamiento de carbono.

## 2.4 Hipótesis

- a) Los modelos alométricos generados a partir del diámetro a la altura del pecho (DAP) estiman con aceptable precisión la biomasa aérea total de los bosques bajo estudio.
- b) Las unidades de manejo forestal "Río Chanchich" y "Uaxactún" presentan diferencias en almacenamiento de carbono en el estrato arbóreo.
- c) El contenido de carbono almacenado en el suelo y hojarasca de las unidades de manejo bajo estudio, no presentan diferencias significativas.
- d) Los bosques intervenidos presentan diferencias significativas en relación a la recuperación del carbono en vegetación, hojarasca y suelo.

### 3. REVISION DE LITERATURA

#### 3.1 El cambio climático, antecedentes e importancia

Apps y Price (s.f) consideran al cambio climático como las alteraciones en el clima general de la Tierra que se esperan por causa del incremento en el efecto invernadero. Estos incluyen modificaciones en los patrones de circulación, precipitación y en otras variables, simultáneos al cambio de temperatura. Los efectos individuales y en conjunto, son asociados con variaciones en la composición química de la atmósfera.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) también lo define, pero incluyendo las actividades antropogénicas, así (IPCC 2001): el cambio climático se refiere a una variación estadísticamente significativa en el estado del clima o en su variabilidad, persistiendo por un período extendido de tiempo (típicamente décadas o más). Estos cambios pueden deberse a los procesos internos naturales o externos, o a los cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en la utilización del suelo.

El cambio climático es quizá la principal amenaza que se cierne sobre el ambiente a nivel global, principalmente en las variaciones de la temperatura y precipitación.

Refiriéndose al tema, Schneider (1989) apunta que según observaciones, el promedio global de la temperatura se incrementará en un grado centígrado respecto a aquella registrada un siglo atrás. Tal teoría postula además, que el incremento de las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, clorofluorocarbono, metano y óxido nítrico - denominados en su conjunto gases de efecto invernadero (GEI) - serán las causantes de tal incremento en los patrones climáticos normales a futuro.

Estos gases, al mismo tiempo que permiten que la luz solar penetre a la atmósfera también atrapan el calor resultante provocando el sobrecalentamiento de la superficie terrestre, proceso natural denominado efecto invernadero (Laarman y Sedjo 1992).

Así como el proceso del cambio climático, el efecto invernadero también ha sido ampliamente estudiado a través de la historia por considerarse parte importante en las variaciones del clima. Por ejemplo, ya en 1896 el químico sueco Svante Arrhenius postuló que el calentamiento global era consecuencia de la quema de combustibles fósiles en Europa (Laarman y Sedjo 1992).

Posteriormente, a partir de mediciones en la atmósfera y modelos de monitoreo del clima, se obtuvo evidencia contundente de que la alteración de origen antropogénico del efecto invernadero, podría provocar problemas graves. Este hecho quedó sustentado en las observaciones hechas en 1958 en Mauna Loa, Hawaii, donde se demostraba que la concentración del carbono atmosférico había incrementado levemente.

Además, datos de estudios hechos en hielo polar sugerían que estas concentraciones se habían elevado por al menos un siglo (Laarman y Sedjo 1992).

En la actualidad, si bien es cierto que se reconocen muchas incertidumbres, está claro que el riesgo de un cambio en los patrones del clima es sumamente alto. La alteración de la temperatura y precipitación en los ecosistemas podría conducir a desastrosos efectos a nivel mundial; la velocidad del cambio climático podría ser tal, que algunos ecosistemas serían incapaces de adaptarse (Alatorre 1997).

### **3.1.1 La convención sobre cambio climático: enfrentando el problema**

Habiéndose reconocido el potencial de daño del cambio climático abrupto, al momento ya existe consenso en la comunidad científica en cuanto a que es indispensable reducir las concentraciones atmosféricas de GEI para evitar el riesgo de interrupciones peligrosas en el sistema climático global.

En el caso del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) —el más importante GEI generado por la actividad humana— el IPCC considera que por principio de precaución, las emisiones deberían reducirse para el año 2050 en un 60 ó 70%, en relación con las emisiones de 1990.

Dados los altos niveles de producción de GEI reportados, hacia el año 1992 en Rio de Janeiro, las naciones del mundo suscribieron la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMCC). Como primer objetivo, los países desarrollados se comprometieron a reducir el total de sus emisiones a un nivel inferior en no menos del 5% al reportado para 1990 para el período de compromiso comprendido entre el año 2008 y el 2012 (Beaumont 1999).

Para cumplirlo, fue aceptada la propuesta de distinguir responsabilidades comunes, es decir, mediante el comercio de emisiones entre países del Anexo B, en el que un país con emisiones menores a sus objetivos puede intercambiar su "exceso" de reducciones con otro país (del Anexo I) mediante acciones de implementación conjunta.

Es así como el protocolo de Kyoto (PK) en su artículo 6, abre el camino a la implementación conjunta (IC) mediante el intercambio de reducciones/absorciones/compensaciones de emisiones de GEI, al establecer la posibilidad de que una parte del Anexo I, pueda transferir o recibir de otra Parte también perteneciente al Anexo I, las unidades de reducción de emisiones provenientes de proyectos destinados a reducir emisiones antropogénicas de GEI o incrementar la absorción por sumideros en cualquier sector de la economía (Beaumont 1999).

Paralelamente, el PK (Art. 12) crea el "Mecanismo para un Desarrollo Limpio" (MDL) – conceptualmente similar a las actividades de IC de la Fase Piloto excepto en la posibilidad de recibir créditos de reducción de emisiones, que antes no estaba contemplada –. Este nuevo programa permite incidir sobre las reducciones de emisiones en los países del Anexo I, a partir del año 2000. Por medio del MDL, el PK crea un vehículo a través del que podrían fluir importantes inversiones de los países industrializados a aquellos en desarrollo, mediante proyectos implementados para mitigar el cambio climático, pero que incluyan explícitamente entre sus objetivos la protección del ambiente y el desarrollo sostenible (IPCC 2001).

### **3.2 El papel de los ecosistemas arbóreos en el cambio climático**

Considerando que los esfuerzos realizados en años pasados para al menos estabilizar las emisiones de los gases de efecto invernadero no han sido del todo fructíferos – por ejemplo el protocolo de Montreal –, la tendencia se enfoca a apelar a las ventajas de los ecosistemas forestales para la captura del carbono de la atmósfera y su fijación en la biosfera. Esto en virtud de que el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) contribuye con el 64% del total de GEI en la atmósfera (Parry y Carter 1998) y con el 80% del total de emisiones (1990) provenientes de las industrias alrededor del mundo (Hurtado 2000).

A juicio de Lemon (1983) el CO<sub>2</sub> atmosférico provee a través del proceso de fotosíntesis, la materia prima para la actividad biológica sobre la Tierra. El mayor almacén de los productos de este proceso es la biomasa en forma de azúcares, almidones, proteínas y grasas. Por esto, al proceso de fotosíntesis se le reconoce que su mayor papel consiste en el balance del contenido de carbono en la atmósfera necesitándose, según Hipkins (1984) de al menos  $4.8 \times 10^5$  joules (J) para fijar un mol de carbono.

Además se reconoce que mediante este proceso se puede remover casi todo el CO<sub>2</sub> del ambiente en pocos años. Sin embargo, la fotorespiración al liberar esta molécula, funciona como contraparte al proceso de captación del dióxido de carbono en la atmósfera, por lo cual el proceso puede llegar a equilibrarse.

Por lo dicho, los bosques juegan un doble papel: el de sumideros<sup>1</sup> de carbono y el de fuente emisora de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Esto también los convierte en agentes y víctimas del cambio climático global (Lugo y Brown 1993), por lo tanto, debería conocerse su rol en los procesos que implica el cambio climático.

---

<sup>1</sup> Sumidero ("sinks") los define la CMCC como los procesos o actividades que remueven los GEI de la atmósfera

Las estimaciones de la FAO (2001) indican que los bosques cubren al año 2000, una superficie de 3.87 Gha<sup>2</sup>, es decir el 47% del total de superficie en los trópicos (Lal 2002). Brown (1996) estimó que éstos contenían 618 Pg<sup>3</sup> de C en el suelo y 340 Pg de C en la vegetación viva y muerta situada por encima y por debajo del nivel del suelo. Esta estimación concuerda con el criterio de Dixon *et al* (1994) y Trexler y Haugen (1995) quienes expresan que el rango varía de 400 a 800 GT y que por lo tanto, contienen el 90% del carbono almacenado en la vegetación terrestre.

Del total de bosque reportado, la mayoría de los sumideros de carbono están localizados en bosques tropicales de baja latitud (62%), mientras que la mayoría del carbono del suelo está localizado en los bosques de alta latitud (boreal) con 54%.

En estas zonas, la cantidad de carbono presente en la vegetación forestal es prácticamente igual a la que se halla en el suelo (Kanninen 2000 y Brown 1996). Así pues, para Trexler y Haugen (1995) el carbono global en la vegetación y suelo de bosques tropicales se estima en 159 GT, es decir, un 8% del total reportado por Kanninen (2000).

El carbono que está en sumideros superficiales varía entre 60 y 230 t C/ha en bosques primarios, y entre 25 y 190 t/C ha en bosques secundarios (Kanninen 2000).

Como se muestra en términos generales, los trópicos poseen un potencial alto para secuestrar y conservar la mayor cantidad de C (80%), seguido por la zona templada (17%) y la zona boreal (3%), y por lo consecuente, se tiene que definitivamente estos bosques (máxime en bosques primarios y secundarios de América) constituyen no sólo un flujo de carbono menor (con 428 Pg C almacenados en suelo y vegetación equivalente al 45% del total) sino un mayor potencial para secuestrarlo mediante practicas de manejo enmarcadas dentro de los mecanismos de mitigación (Brown *et al* 1996) propuestos por la CMCC.

Un mecanismo de mitigación o limitación es aquel que procura tratar las causas del cambio climático inminente mediante acciones que previenen o retardan los aumentos de los niveles de GEI limitando fuentes actuales y futuras de la emisión y realzando sumideros potenciales de estos gases. La adaptación, por otro lado, pretende un ajuste a los efectos adversos pasivos, reactivos o de anticipación que se puedan adoptar para mejorar anticipadamente las cosecuencias del cambio climático (Brown *et al* 1996).

---

<sup>2</sup> 1 Gha = 10<sup>9</sup> ha, es decir, mil millones de ha

<sup>3</sup> 1 Pg = 10<sup>15</sup> g, es decir una gigatonelada -GT-, ó mil millones de toneladas

Bajo este esquema, en países del trópico el secuestro del carbono constituirá un beneficio más de las actividades de ordenamiento forestal, ya que al reducir las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> se mitiga el cambio climático (Brown 1996), además, dependiendo de la duración de los productos y subproductos forestales, así se mantendrá almacenado el carbono fijado<sup>4</sup>.

Igualmente es importante el componente suelo en los flujos de carbono entre la litósfera, biosfera y la atmósfera dados los niveles de degradación de las áreas por cambio de cobertura o cambio de uso de la tierra mayormente dado en los trópicos en países en desarrollo.

En la actualidad se reconoce que los trópicos contienen alrededor de 496 Pg de carbono orgánico en el suelo (SOC, por sus siglas en inglés) o sea el 32% del total (Lal 2002).

Esto es importante desde el punto de vista de los flujos de carbono. Por ejemplo, observando los registros históricos de las pérdidas de los almacenes de carbono orgánico en el suelo debido al cambio de uso de la tierra y a los cultivos, se tiene un rango posible de 17 – 39 Pg comparado con la pérdida global de 66 – 90 Pg. Por tanto, si al menos 60% del total de carbono orgánico en el suelo pudiera ser secuestrado de nuevo a través de prácticas de mitigación y conservación, el potencial de captura del carbono orgánico del suelo en los trópicos sería de 12 – 27 Pg para un período de 25 a 50 años.

Más específicamente, el potencial de secuestro de carbono en los suelos y en la biomasa de los trópicos se estima en 10 – 25 Pg debido al control de la erosión, 5.7 – 10.8 Pg a través de la restauración de suelos y ecosistemas degradados, 58 – 115 Pg a través del uso de combustibles alternativos; 2.2 – 4.1 Pg por adopción de técnicas y prácticas sostenibles en cultivos; y 6 – 12 Pg a través de adopción de técnicas sostenibles en pastoreo (Lal 2002).

El panorama sugiere un futuro alentador, sin embargo debe tenerse en cuenta que el secuestro del carbono en los suelos por sí solo, no podría resolver el problema del aumento de las concentraciones de la molécula en la atmósfera -3.4 Pg por año- (Izaurralde 2001), máxime si el protocolo de Kyoto no ofrece créditos de reducción en suelos cultivados o con cobertura boscosa natural.

Estudios que demuestren la potencialidad de los suelos para secuestrar carbono en áreas con cobertura forestal natural, tendrían que desarrollarse con el fin de que se incluyan proyectos de este tipo en los acuerdos internacionales de reducción de emisiones.

Hasta el momento, los estudios realizados (Olson citado por Anderson 1992) sugieren un estimado de carbono orgánico en el suelo entre el rango de 1300 – 1600 Gt, el cual corresponde a casi dos veces el carbono en la biomasa terrestre.

---

<sup>4</sup> Se concibe el carbono fijado como aquel carbono que una unidad de área cubierta por vegetación tiene la capacidad de fijar en un período determinado (Brown 1996)

### 3.3 Metodologías para la cuantificación de biomasa y carbono en bosques naturales tropicales

En el transcurso del tiempo, han sido desarrolladas e implementadas diferentes técnicas para estimar la biomasa en estudios ecológicos, agrícolas y de investigación forestal. Las técnicas más viables dependen del objetivo del estudio, presupuesto disponible, tamaño del área a valorar, precisión requerida, estructura y composición de la vegetación y del grado de especificidad del estudio (Catchpole y Wheeler 1992).

Respecto a cifras de flujos del carbono en los bosques, diversos autores acuden a varias metodologías para su estimación. Sin embargo, todos están conscientes de las limitaciones de procedimiento y los problemas de asimetría para medir emisiones y capturas (por ejemplo, se considera la emisión como permanente pero la captura como relativa como en el caso de las plantaciones comerciales). Otras limitaciones son de criterios de muestreo y selección de sitio, por ejemplo la inclusión o no de áreas urbanas, cultivos estacionales, cultivos permanentes, pastizales y agricultura, humedales y pantanos, áreas quemadas, fronteras y otras áreas en las que no es posible determinar su uso (Fearnside 1992).

Los primeros estudios de la fitomasa utilizaban métodos muy sencillos pero poco precisos, que consistían en cortar y medir un solo árbol de talla promedio y multiplicar la masa de sus diferentes partes por la cantidad de árboles plantados en la parcela de terreno. Ya que ningún árbol es representativo del conjunto de la población, los estudios posteriores estratificaron la población. En general, se distinguían de tres a cinco categorías y se realizaba una medición para cada una (Locatelli y Leonard 2001).

Los estudios de biomasa son esenciales para obtener un aproximado de la cantidad de carbono almacenado, ya que de acuerdo a varios autores, la relación de la biomasa seca total con el carbono es de aproximadamente 2:1 (Malhi y Grace 2000, Ciesla 1995, Snowdon *et al* 2001). Por ello, las evaluaciones más recientes utilizan métodos estadísticos que permiten tomar en cuenta la diversidad de especies y sus dimensiones.

A continuación, se recopilan algunos métodos directos (destructivos) e indirectos, en los que los autores se han basado para cuantificar la biomasa y contenido de carbono en bosques del trópico.

### 3.3.1 Estimación de biomasa aérea y carbono

#### 3.3.1.1 Modelos alométricos para la predicción de variables de biomasa y carbono

Un modelo alométrico es una relación matemática entre una variable independiente y una dependiente. La primera puede ser estimada a partir de métodos destructivos (peso de componentes de individuos) o a partir de parámetros biométricos estimados en campo directamente (dap, altura, p.e). A partir de estos datos, se puede establecer el grado de relación entre ésta y alguna variable derivada como biomasa (Chacín 1998, Nelson *et al* 1999).

La ventaja plausible de la técnica es que las prácticas destructivas se realizan una sola vez y a partir de las ecuaciones generadas, se puede estimar la variable independiente basándose en datos de inventarios forestales por ejemplo. Las desventajas giran en torno a que: las ecuaciones son basadas en un mínimo grupo de individuos o especies; no se puede generalizar una ecuación estimada a otro tipo de vegetación (bosque primario a secundario, por ejemplo); y, aún cuando una ecuación fue desarrollada para bosques secundarios, su aplicación es restringida para los árboles con parámetros de medición directa en campo (Fearnside 1992, Brown y Lugo 1992, Nelson *et al* 1999, Catchpole y Wheeler 1992).

Como primera aproximación, diferentes autores se han basado en ecuaciones ya establecidas para cuantificación de biomasa en el trópico pero han generado propias. Ejemplos de estudios importantes se detallan a continuación.

Brown y Lugo (1982 y 1984) han realizado dos estimaciones del total de biomasa (hipógea y epígea) en bosques tropicales a partir de ecuaciones de regresión con datos provenientes de parcelas experimentales o métodos destructivos. Estos autores, junto a Gillipsie (1989) desarrollaron y probaron ecuaciones de regresión a partir de nueve bases de datos. Analizaron ecuaciones lineales y transformadas de tres tipos de bosque según clasificación de zona de vida asumiendo algunos supuestos técnicos. Al mismo tiempo, evaluaron ecuaciones multivariadas (conocida también como doble muestreo, incluyendo una combinación de dap, altura y gravedad específica). Por último, los autores aplicaron los modelos a datos de parcelas de inventario y tablas de volumen.

Catchpole y Wheeler (1992) afirman que la técnica del doble muestreo representa un costo y una precisión moderada al estudio. Además, consideran que si bien es cierto las ecuaciones generadas pueden utilizarse para otros sitios con estimaciones mínimas, debieran ser probadas combinando alguna técnica destructiva.

Sin embargo, la eficiencia de este método depende del grado de correlación de la biomasa con las variables independientes usadas, la variabilidad espacial de la vegetación, el número de muestras y el número de repeticiones de la variable independiente.

Por ejemplo, Segura y Kanninen (2001) proponen el uso de metodologías destructivas (muestreos para estimación en campo mediante la tumba de individuos) siguiendo criterios estadísticos y la generación de modelos alométricos que incluyan las variables Dap y biomasa aérea total principalmente. Su aplicación en Nicaragua y Guatemala son estimaciones reales que han servido de base para la estimación del carbono almacenado en la biomasa aérea total.

### 3.3.1.2 Inventarios forestales

Los inventarios forestales han sido utilizados muy frecuentemente para estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales. Por ejemplo, Ogawa *et al* citados por Locatelli (1999) utilizaron técnicas de muestreo y dendrometría así como la determinación de correlaciones entre el peso de materia seca y las dimensiones del árbol mediante la aplicación de ecuaciones alométricas.

Brown y Lugo (1992) por su parte, utilizaron estimaciones de flujos de carbono partiendo de cambios en el uso del suelo del trópico que eran derivados de modelos cuyos resultados dependían en parte de estimaciones de biomasa en los bosques.

Para la estimación de los flujos del Amazonas, los datos provenían de inventarios que cubrían 13.2 millones de hectáreas (3% del total del área reconocida) con una intensidad de muestreo de 0.01%. Otra fuente de datos para este estudio fue la obtenida por un proyecto de RadamBrasil a inicios de 1970. Ambas consideraban datos de biomasa por encima del suelo (árboles con dap > o igual a 10 cm) incluyendo hojas, ramas y corteza, entre otros; datos de biomasa por debajo del suelo; materia orgánica e información de volumen.

Brown *et al* 1989 sostienen que la información proveniente de inventarios forestales como los descritos son la única base de datos para la estimación de biomasa al nivel de paisaje y que a partir de estos, se mejorarán las estimaciones de biomasa por encima del suelo puesto que los datos de volúmenes son más abundantes y son generalmente colectados de áreas de muestreo grandes utilizando un método de muestreo diseñado para lograr la representatividad de la población de interés.

El criterio es sostenido pese a las críticas de procedimiento hechas por Fearnside (1992) en cuanto a que los inventarios sobreestiman los valores - de 28 a 47% - por errores en la utilización de factores de conversión para calcular la biomasa a partir del volumen entre otros.

Además, existen errores en las estimaciones puesto que un inventario forestal (a) no permite que se especifique la densidad básica de la madera por especie en particular; (b) no discrimina los árboles podridos o huecos, (c) no toma en cuenta el grosor de corteza y factores de forma para cada especie; y (d) no incluye datos de biomasa menor a 10 cm dap y de palmas y raíces.

Brown y Iverson (1992) y Brown (1997) haciendo una revisión de los esfuerzos para la cuantificación de biomasa y flujos de carbono, también detallan algunos problemas típicos encontrados en ensayos hechos a partir de inventarios forestales así: (a) el rango de clases diamétricas es muy reducido (regularmente entre 30 y 50 cm dap); (b) se agrupa a los árboles mayores de 80 cm en una sola clase diamétrica imposibilitando su estimación individual; (c) no todas las especies son incluidas en el estudio; (d) las bases de datos de los inventarios datan de fechas muy antiguas asumiendo que los bosques aún existen cuando la realidad es otra; y (e) la descripción de los bosques es muy limitada.

Actualmente, se siguen reportando ciertos errores en las estimaciones de la biomasa a partir de datos de inventarios forestales como es el caso de un estudio llevado a cabo en Chile por Locatelli y Leonard (2001). Aquí los autores recalcan la imprecisión de resultados debido al enfoque global de este tipo de estudios. También hacen énfasis en la falta de estimaciones en estratos inferiores, raíces, madera muerta y hojarasca, entre otros.

### **3.3.1.3 Factores de ajustes en las estimaciones de biomasa aérea total y carbono**

Los métodos indirectos utilizados para estimar la cantidad de biomasa y carbono por encima del suelo requieren de factores de conversión, por ejemplo de volumen a peso seco, es decir la gravedad específica verde y la gravedad específica seca (Ortíz 1997 y Segura 1997).

El margen de error en la densidad es bajo, inferior al 5% según Brown y Lugo (1984). Como contraparte, los factores de expansión (de biomasa o volumen) pueden variar de manera significativa con las dimensiones del árbol (Locatelli 1999) pero son considerados por algunos autores como un método indirecto eficiente en la estimación de la biomasa de individuos mayores (Brown y Lugo 1992).

Como ejemplo se considera el estudio de Gonzáles y Fisher (1998) donde se reflejó que efectivamente, se presentaron diferencias significativas entre muestras de madera de *Vochysia guatemalensis* para cuatro sitios estudiados en Costa Rica cuyos patrones climáticos variaban ampliamente (temperatura y precipitación) y entre los componentes de un árbol individual.

Pese a estas particularidades, ambos son necesarios para obtener una aproximación más real del contenido de biomasa en los bosques y su posterior conversión a contenidos de carbono (Fearnside 1992).

La gravedad específica de la madera es definida por ASTM (1983) como el peso de cualquier volumen de una sustancia dividida por el peso de un volumen igual de agua. Como tanto el peso como el volumen de la madera varían con la cantidad de humedad contenida en ésta, la gravedad específica es indefinida a menos que las condiciones bajo las cuales se determine sean claramente especificadas.

El factor de expansión de biomasa es definido por Brown (1997) como la razón entre el total de biomasa (en base seca) por encima del suelo de los árboles mayores de 10 cm dap y el total de biomasa (en base seca) de los fustes.

Al final, el total de biomasa por encima del suelo ajustado se calcula mediante la aplicación de los factores de ajuste de expansión de biomasa y la densidad básica (g/cc) al multiplicarlo por el volumen comercial del fuste ( $m^3/ha$ ). Por ejemplo Brown y Lugo 1992, analizando datos de inventarios de bosques tropicales, utilizaron una relación entre la biomasa del fuste y el factor de expansión de biomasa para obtener una ecuación de regresión exponencial ( $n = 56$ ;  $R^2$  ajustado = 0.76) cuya variable dependiente era la biomasa del fuste.

### **3.3.2 Estimación del carbono en hojarasca**

La vegetación muerta situada por encima del suelo está constituida por restos de tallos, ramas, hojas, flores y frutos, principalmente. Al depositarse éstos sobre la superficie del suelo, conforman la hojarasca o bien la capa de mantillo y al mismo tiempo comienzan los procesos de descomposición mediante la mineralización y la humificación.

Dentro de la capa de mantillo se diferencian tres subcapas, que reciben nombres específicos en la nomenclatura de los suelos:  $O_L$ ,  $O_F$  y  $O_H$  (Fassbender 1993).

La descomposición de la materia orgánica contenida en estas subcapas se lleva a cabo en niveles distintos, principalmente dependiendo de la cantidad de hojarasca y su contenido interno. Al mismo tiempo, también influyen los factores externos del suelo, la población de microorganismos, las condiciones de pH, agua disponible y elementos nutritivos, entre otros.

En función de las características de la capa de mantillo y las subcapas mencionadas, se han diferenciado tres términos para caracterizar los tipos de mantillo: "mull", "moder" y "humus bruto".

En condiciones tropicales y subtropicales, prácticamente solo se tiene el "mull", que se caracteriza por una gran velocidad en el proceso de transformación de restos vegetales. Tanto así, que en un año desaparecen las hojas como tales, formando parte de la capa del suelo mineral, rica en sustancias húmicas.

La transformación de la materia orgánica en la hojarasca puede interpretarse también como la formación de carbono orgánico en el suelo. Raramente, este contenido de carbono orgánico está en relación inversa a la profundidad en el perfil del suelo.

Los estudios para las estimaciones de estos contenidos de materia orgánica y carbono orgánico en el suelo han sido necesarias principalmente para responder a la demanda de información de niveles de fertilidad y productividad en una zona definida. Sin embargo, la gran mayoría se enfoca a áreas de cultivos agrícolas y no a ambientes forestales y sus complicaciones inherentes de muestreo entre otros.

Así pues, para la estimación de los niveles de hojarasca y carbono orgánico, se considera que es necesario realizar los muestreos dependiendo del tipo de suelos y del tipo de bosques con tal de no incurrir en errores estadísticos.

En ese sentido, Díaz-Romeu *et al* (1970) reportan una variación de 1.75 a 3.6% en el contenido de carbono para diferentes clasificaciones de suelos y de 2.19 a 4.9% según formaciones ecológicas (trópico seco a muy húmedo).

Cornejo y Lombrado (1993) por su parte, dividieron el área de muestreo en bosque inundable (*Tessaria integrata* y *Cecropia peltata*), bosque ficus-cedro (*Ficus insipida* y *Cedrela odorata*), bosque transicional o joven (*Ficus spp*, *Cedrela spp*, *Guarea spp*, *Guatterria spp*) y bosque maduro. Realizaron muestreos en parcelas de 1x1 m colectando todo el material vegetal (< 2.5 cm diámetro) quincenalmente y para la estimación de la biomasa se llevó el peso seco a constante partiendo de submuestras de 30 g. Además, se realizó un análisis químico foliar a las 14 especies más abundantes o que por su copa aportaban mucha hojarasca; esto último con el fin de evaluar la relación entre la cantidad de nutrientes y la fertilidad de los suelos.

Respecto a la fijación del carbono en la hojarasca, Fassbender y Bornemisza citados por Fassbender (1983) sugieren que en ecosistemas tropicales, el sistema se mantiene más o menos constante. Sin embargo, recientes investigaciones han demostrado que efectivamente, los contenidos de carbono orgánico en la hojarasca (y suelo) son significativos.

De esta manera, el rango reportado por varios autores oscila entre 3.2 y 10 toneladas de biomasa de hojarasca por hectárea en estudios realizados en el trópico americano (Klinge y Rodríguez 1968, Goley *et al* 1971, Sampaio *et al* 1993).

### **3.3.3 Estimación del carbono almacenado en el suelo**

A nivel general, las estimaciones son muy variables, de 700 mil millones a 3 billones de toneladas, lo que representa, para los intercambios activos con la atmósfera, las dos terceras partes de carbono de los ecosistemas terrestres. Los estudios para generar tales resultados han tenido que realizarse estratificando por tipo de suelo, cubierta vegetal, topografía, condiciones hidrológicas, altitud y grado de explotación humana (Buring y Schlesinger Post *et al*, citados por Locatelli 1999).

Modelos como el Rothamsted (Jenkinson *et al* 1991) han sido utilizados eficientemente para calcular el monto potencial de CO<sub>2</sub>, en este caso, que se liberaría a la atmósfera a partir del contenido en la materia orgánica y suelo en respuesta al cambio climático.

Este y otros modelos utilizados (CO2FIX, por ejemplo) han dejado al descubierto la importancia de los suelos como reservorios de carbono (Nabuurs 1996) y al mismo tiempo han revelado que la variable que influencia la capacidad de los suelos para almacenar el carbono orgánico es la alta precipitación pluvial, lo cual es típico en el trópico. Lugo y Brown (1993) por ejemplo, evaluaron que en un bosque primario tropical en Costa Rica, la variabilidad en carbono orgánico en el suelo incrementa con la disponibilidad de agua.

La estimación de la fracción de carbono fijada en el suelo, con menor experiencia, ha sido basada en literatura con verificaciones de campo; otras, sin embargo, han optado por mediciones físicas para obtener los valores de fijación. Su objetivo ha sido medir el contenido de carbono en los primeros 30 cm de profundidad usando una muestra para determinar materia orgánica y densidad aparente del suelo. En este sentido, Márquez (2000) propone coleccionar una muestra de suelo, homogenizarla y cernirla con una malla de 5 mm. De aquí, escoger aleatoriamente una muestra y separarla en bolsas identificadas. Mediante la técnica del cilindro, se calcula la densidad aparente del suelo con una muestra sometida a 100° C por 72 horas. El carbono del suelo finalmente se calcula mediante la multiplicación del contenido de carbono (% de literatura) por la densidad aparente y la profundidad de muestreo.

## 4. MATERIALES Y METODOS

### 4.1 Esquema general

El Cuadro 1 muestra las especificaciones de metodología, análisis y resultados esperados según los objetivos planteados.

**Cuadro 1. Resumen general de la metodología, análisis y resultados esperados en la investigación**

METODOLOGIA	ANALISIS ESTADISTICO	RESULTADOS ESPERADOS
<b>Objetivo específico 1:</b> Desarrollar modelos alométricos para estimar la biomasa aérea total en los bosques manejados bajo estudio.		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Revisión de Plan de Manejo Forestal y Plan Operativo Anual.</li> <li>▪ Selección de áreas y diseño de muestreo.</li> <li>▪ Levantamiento de información dasométrica en unidades de muestreo</li> <li>▪ Muestreo a individuos según tipo de vegetación mediante técnicas destructivas y no destructivas.</li> <li>▪ Determinación de materia seca, gravedad específica y factores de expansión de biomasa.</li> <li>▪ Validación de ecuaciones de regresión generadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estadística descriptiva</li> <li>▪ Medidas de tendencia central y de dispersión.</li> <li>▪ Estimación de error de muestreo y límites de confianza.</li> <li>▪ Índices de exactitud.</li> <li>▪ Medidas de bondad de ajuste para las ecuaciones de regresión.</li> <li>▪ Validación de hipótesis de significancia del modelo y los parámetros de las ecuaciones alométricas, según criterios de Andeva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abundancia, composición y dominancia de la vegetación arbórea aérea.</li> <li>▪ Gravedad específica y factor de expansión de biomasa por especie.</li> <li>▪ Ecuaciones de regresión de biomasa y carbono almacenado.</li> </ul>
<b>Objetivo específico 2:</b> Cuantificar el contenido de carbono almacenado en la biomasa aérea total y bajo el suelo de los bosques bajo manejo forestal mejorado en "Río Chanchich" y "Uaxactún".		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muestreo de hojarasca y suelo.</li> <li>▪ Aplicación de las ecuaciones de regresión generadas por tipo de vegetación.</li> <li>▪ Cálculos de biomasa aérea total (t) por tipo de vegetación y unidad de manejo</li> <li>▪ Estimación del carbono almacenado en hojarasca y suelo de las unidades de manejo bajo estudio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estadística descriptiva.</li> <li>▪ Pruebas de comparación de medias de gravedad específica, fracción de carbono, contenidos de carbono, entre otros.</li> <li>▪ Análisis de varianza de los contenidos de carbono en el suelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Variables por hectárea de biomasa aérea total y carbono para vegetación, hojarasca y suelo.</li> </ul>
<b>Objetivo específico 3:</b> Determinar el potencial de recuperación del bosque en términos de almacenamiento de carbono.		
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muestreo de claros de tumba según clase diamétrica y especie aprovechada para seis áreas intervenidas.</li> <li>▪ Muestreo de regeneración natural establecida en claros de tumba, vías de arrastre y patios de acopio de las seis áreas intervenidas.</li> <li>▪ Muestreo de hojarasca y suelo en claros de tumba, vías de arrastre y patios de acopio en seis áreas intervenidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estadística descriptiva</li> <li>▪ Análisis de varianza (pruebas de <i>t student</i> y <i>F</i>).</li> <li>▪ Aplicación de las ecuaciones de regresión de biomasa aérea total generadas en este estudio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Estimación del área promedio de claros de tumba.</li> <li>▪ Estimación del carbono almacenado por la regeneración natural establecida, hojarasca y suelo en claros de tumba y vías de arrastre para diferentes años de aprovechamiento.</li> </ul>

## 4.2 Caracterización del área de estudio

Geográficamente, el área de estudio se ubica dentro de los límites de la Zona de Uso Múltiple (ZUM) de la Reserva de Biosfera Maya (RBM), en el departamento de Petén, Guatemala. Los bosques bajo estudio se localizan específicamente dentro de los límites respectivos definidos como áreas de aprovechamiento anual de las unidades de manejo "Uaxactún" y "Río Chanchich".

La UM "Uaxactún" cuenta con cerca de 83,500 ha y está ubicada en el municipio de Flores, al norte del parque "nacional "Tikal" en las coordenadas 17°19'36" y 17°40'0" N; y 89°30'55" y 89°41'53" W (Bámaca 2000); la UM "Río Chanchich" cuenta con una superficie aproximada de 12,170 ha que se encuentran dentro de las coordenadas 17°36'18" y 17°25'44" N; y 89°09' 20" y 89° 11' 22" W, en jurisdicción municipal de Melchor de Mencos (SCIS/NPV 2000).

### 4.2.1 Condiciones biofísicas

Ambas unidades de manejo sufren modificaciones en sus características propias debido principalmente a su ubicación dentro de la plataforma de Yucatán, con características karsticas y drenaje superficial. Además, comparten las características de la misma zona de vida: bosque húmedo subtropical cálido - Bh-Sc - según la clasificación de Holdridge (UNEPET 1991).

A continuación se comparan las características individuales por unidad de manejo (Cuadro 2).

**Cuadro 2. Resumen analítico de las principales características biofísicas de las unidades de manejo forestal.**

Característica	UM "Uaxactún"	UM "Río Chanchich"
Topografía/ relieve	150 a 4000 msnm; ondulado a escarpado	Pendientes de 0 a 40%
Geología/ suelos	Poco profundos, bien drenados ; Serie Uaxactún y Yaxhá.	Áreas elevadas de karst y drenaje subterráneo y áreas bajas con aluviones calcáreos. Serie Yaxhá.
Clima	T media: 25° C; HR: 77%; Evapot : 798 mm ; PP/año: 1500-3000 mm	
Hidrología	Corrientes efímeras y permanentes	Corrientes efímeras
Uso suelo	98% forestal; bosque medio, bajo y humedal, suelo desnudo.	100% forestal
Vegetación	89 % individuos > 15 m 9% individuos < 15 m. Ambos: 25.87 m <sup>3</sup> /ha comercial > 10 cm dap	26.043 m <sup>3</sup> /ha (≥ 25 cm dap)

Fuente: UNEPET (1991)

### 4.3 Selección de áreas de estudio

Las unidades de manejo forestal "Uaxactún" y "Río Chanchich" son consideradas representativas del manejo forestal sostenible en la Zona de Uso Múltiple (ZUM) de la Reserva de Biosfera Maya (RBM). Dentro de estas unidades de manejo, existen áreas designadas como áreas anuales de aprovechamiento forestal (también conocidas como áreas donde se aplica el plan operativo anual --POA--) variando en extensión según intereses madereros y de óptima planificación de actividades de orden sostenible.

En tal sentido, la población para el presente estudio queda conformada de la forma siguiente (Cuadro 3):

**Cuadro 3. Planes operativos anuales como población meta para el estudio**

Unidad de manejo	Nombre del POA	Area del POA (ha)	Año de ejecución
"Río Chanchich"	Catrachas	406	1998
	Zorro	265	2001
	Desertados	366	2002
"Uaxactún"	Tanque	150	2000
	Tigre	265	2001
	-sin nombre-	400	2002

El POA denominado "Catrachas" ejecutado en el año 1998, se constituye como la primera experiencia de la sociedad civil "Impulsores Suchitecos" en el manejo y administración de los recursos forestales concesionados por mandato legal. De igual forma, la sociedad civil "Organización Manejo y Conservación --OMYC-- se inicia como usufructuaria de los recursos mediante la ejecución del POA denominado "Tanque" en Uaxactún. Se prevé con ello que la experiencia en el manejo forestal comunitario sea distinta para ambas poblaciones.

El área a muestrear para la estimación de biomasa aérea total y carbono lo constituyó únicamente un cuadrante del POA 2002 de la unidad de manejo "Río Chanchich", escogido al azar. Para el caso de la unidad de manejo "Uaxactún", se obtuvo información complementaria a la registrada por Aguilar (2002).

Ahora bien, las áreas de aprovechamiento restantes en ambas unidades de manejo, sirvieron de base para el levantamiento de información dasométrica de la vegetación en claros de tumba, vías de arrastre y patios de acopio, así como para la estimación del contenido de carbono en hojarasca y suelo en ambas unidades de manejo.

#### **4.4 Diseño de muestreo y distribución de parcelas**

Aleatoriamente se eligió uno de los tres cuadrantes (A,B y C) que constituyen el área de corta 2002 de la UM "Río Chanchich"; en este caso, el cuadrante "C". Partiendo del límite sur con el cuadrante "B", se trazaron líneas sistemáticamente a lo largo de los carriles del censo comercial ya existentes. Las parcelas de muestreo se ubicaron con un distanciamiento constante de 200 m dentro de carriles y 300 m entre carriles del censo.

Considerando que las fajas (aproximadamente 10 m de ancho) trazadas para el "monteo" de la madera (censo comercial) necesariamente crearon un disturbio en el bosque principalmente en la regeneración natural establecida, las unidades muestrales fueron delimitadas en campo evitando el efecto de borde mediante la delimitación de una faja de alrededor de 45 m por ambos lados.

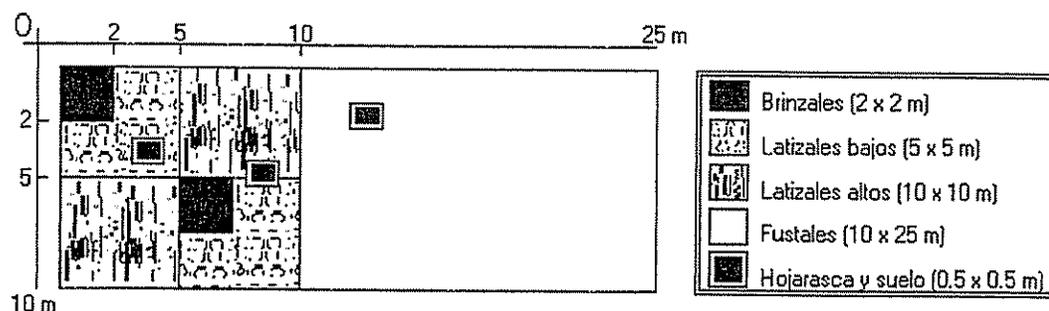
Siguiendo los criterios técnicos propuestos por Segura y Kanninen (2001), las parcelas de muestreo tuvieron un tamaño de 10 x 25 m, es decir 0.025 ha y se distribuyeron sistemáticamente (Figura 1). El tamaño de la muestra quedó constituido por 18 parcelas para el POA 2002 de la unidad de manejo "Río Chanchich".

La orientación de las parcelas fue de sur a norte y fueron identificadas apropiadamente mediante "balizas" o estacas de madera de al menos 1.5 m de altura y al menos 10 cm de diámetro dispuestas una en cada esquina. El extremo superior fue marcado con pintura roja y contó, al menos una de ellas, con una cinta que identificara los aspectos generales de la parcela.

Las parcelas de muestreo establecidas en áreas de aprovechamiento pasado (Cuadro 3), fueron distribuidas al azar y con forma circular en claros de tumba (Figura 3) y rectangular en vías de arrastre (Figura 4).

#### **4.5 Estimación de biomasa aérea total**

Para el muestreo en las 18 parcelas se distinguió a la vegetación en cuatro categorías claramente definidas así: fustales (individuos cuyo dap es  $\geq 10$  cm), latizales altos (individuos con rango diamétrico de 5.1-9.9 cm dap), latizales bajos (individuos con rango diamétrico de 1.5-4.9 cm dap) y brinzales (vegetación comprendida entre 0.30 y 1.5 m de altura). Para todos los tipos de vegetación fueron estimados las variables dasométricas generales (Dap y altura total) y para los fustales también se registró su altura comercial -con lo cual se obtuvo el volumen mediante la ecuación de la FAO (UNEPET 1992)-.



**Figura 1. Parcela de muestreo para el levantamiento de la información dasométrica y biomasa**

a) Regeneración natural establecida.

De todas las subparcelas (exceptuándose para brinzales, donde se escogieron hasta seis árboles) se seleccionaron dos o tres individuos al azar por tipo de vegetación (brinzales, latizal bajo y latizal alto) según la frecuencia, con lo que se obtuvo una submuestra de alrededor de 12 individuos para la estimación de peso seco.

El peso total por individuo registrado se subdividió en peso de tallo, ramas y de hojas y se tomó una submuestra para la materia seca.

En total, el estudio incluyó registros de 161 individuos distribuidos en 81 brinzales, 29 latizales bajos y 51 latizales altos.

b) Fustales.

Con el objetivo de abarcar clases diamétricas superiores, se procedió a elegir fustales (10-50 cm dap) que iban a ser tumbados como resultado de la habilitación de los patios de acopio. Este muestreo se realizó en los cuadrantes "A" y "B".

A estos individuos se les determinó su peso también por componentes (incluyéndose follaje y ramillas con diámetro menor a 2 cm) y se colectó una submuestra para materia seca.

El tamaño de la muestra obtenida en patios de acopio fue de 24 individuos para el POA "Desertados" y de 10 individuos para el POA 2002 en la unidad de manejo "Uaxactún" (Cuadro 4).

Por otro lado, dado a que en Guatemala el diámetro mínimo de corta (DMC) que la ley establece es de 50 cm dap para especies secundarias y 60 cm dap para especies primarias se realizó el muestreo aprovechando su tumba como parte del plan de aprovechamiento forestal. Este muestreo se llevó a cabo en todo el área de aprovechamiento.

En ese sentido, para procurar un dato estimado de la biomasa de éstos individuos se procedió a la cubicación de los fustes (comerciales y no comerciales) y ramas (comerciales) en secciones no mayores a 2 m mediante la fórmula de Smalian (Prodan *et al* 1997):

$$V = \sum [ ((D_1 + D_2)/2)^2 \times (\pi / 4) \times Lt_i ] \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde: V = Volumen (m<sup>3</sup>) del fuste o rama; D<sub>1</sub> = Diámetro del extremo grueso de la troza en fuste o rama (m); D<sub>2</sub> = Diámetro del extremo delgado de la troza en fuste o rama (m); Lt<sub>i</sub> = Longitud de la sección o troza i (m)

El 30% (32 individuos) del total de individuos cubicados se escogió como submuestra para el registro del peso en campo de las ramas menores a 20 cm de diámetro y se colectó una muestra para la estimación de materia seca.

Para los efectos de cubicación, se dividió al individuo en las siguientes secciones:

- (a) Tocón: Sección del fuste que regularmente es dejada en campo luego del aprovechamiento del individuo cuyas variables (diámetro y altura) varían principalmente dependiendo del Dap del individuo y de la altura del corte (Bámaca 2002).
- (b) Fuste comercial: corresponde a la sección del fuste sin daños ni ramificaciones.
- (c) Fuste no comercial: se entiende como las secciones del fuste con algún tipo de daño o ramificación que desmerece el potencial comercial.
- (d) Ramas comerciales: Son todas las ramas que posee el individuo tumbado con diámetro de 20 cm en adelante.
- (e) Ramas con potencial comercial: se refiere a las ramas pequeñas cuyo diámetro oscila entre 2 y 20 cm.

Puesto que la mayoría de individuos presentaban tocones con formas irregulares, fue necesario estimar las variables primarias en promedio y al mismo tiempo estimar el volumen del tocón por medio de la ecuación de neiloida truncada (Prodan *et al* 1997):

$$V_T = (\pi / 4) \times L \times [ D_i^2 + ( D_i^2 + (D_i^4 D_s^2) \frac{1}{3} + (D_i^2 D_s^4) \frac{1}{3} + D_s^2 ) / 4 ] \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde: V<sub>T</sub> = Volumen (m<sup>3</sup>) del tocón con dimensiones irregulares por efecto de gambas; L = Altura promedio del tocón; D<sub>i</sub> = diámetro promedio inferior del tocón; D<sub>s</sub> = diámetro promedio superior del tocón.

Por otro lado, para la estimación de la gravedad específica el número de submuestras dependió de la disponibilidad comercial de los individuos, es decir, algunas veces la muestra por individuo consistía únicamente de una muestra de tocón<sup>5</sup>, principalmente si las ramas no tenían definido un mercado inmediato; o bien, únicamente una muestra de ramas en los individuos en los cuales el individuo fue tumbado sobre el tocón.

Para la unidad de manejo "Río Chanchich" (POA 2002, "Desertados") se cuenta con datos de gravedad específica de las especies *Terminalia amazonia*, *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Lysiloma* spp., *Lonchocarpus castilloi*, *Vochysia hondurensis* y *Calophyllum brasiliense*.

Para el segundo sitio de estudio, la unidad de manejo "Uaxactún" (POA 2002) se cuenta con datos de gravedad específica de *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Lysiloma* spp., *Lonchocarpus castilloi* y *Calophyllum brasiliense*.

Para el presente estudio, el criterio de selección de los datos a utilizar en las estimaciones fue discriminar primeramente por sitio, luego por especie y por último por clase diamétrica.

Todos los muestreos en fustales fueron realizados tomando en cuenta la frecuencia de individuos por clase diamétrica y especie, de tal manera que resultó en la selección de una mayor cantidad de individuos de la clase diamétrica de 10 a 20 cm y progresivamente disminuyéndose el muestreo conforme aumentaba la clase diamétrica (cuadro 4).

**Cuadro 4. Número de individuos por clase diamétrica utilizados como submuestra**

Unidad de Manejo	Variable	Clases diamétrica (cm)											Total
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	≥ 110	
Río Chanchich	N. Ind	9	7	6	2	24	12	10	3	2	2	3	80
	N. Esp.	9	6	5	2	6	7	3	2	3	3	2	24
Uaxactún	N. Ind.	-	-	6	4	20	22	3	1	1	2	-	59
	N. Esp.			4	4	5	5	3	2	2	2	2	11

N. Ind.: Número de individuos muestreados (su total es una suma algebraica); N. Esp.: Número de especies (el total no corresponde a la suma algebraica, sino al número de especies encontradas)

Por último, pese a que la literatura considera al follaje de los individuos mayores como imprescindible en la estimación de la biomasa total de los individuos (Fearnside 1992), en este estudio no se consideró pues representaba un costo alto respecto a tiempo y recursos económicos.

<sup>5</sup> Por razones de importancia comercial, no se colectaron muestras del fuste propiamente dicho, sino del tocón pues no se comercializa y constituye residuos del aprovechamiento.

#### 4.6 Hojarasca y suelo

El muestreo de hojarasca y suelo fue aleatorizado y distribuyendo las tres subparcelas (0.50 x 0.50 m, es decir 0.75 m<sup>2</sup> en total) siguiendo una trayectoria en diagonal derecha-izquierda partiendo de un lindero y un rumbo fijo (Figura 1). De aquí, se homogenizó lo colectado en las tres subparcelas, registrándose el dato de su peso y se tomó una muestra de al menos 200 g para materia seca (hojarasca).

Con el porcentaje de materia seca de cada submuestra de hojarasca, se estimó la biomasa total de hojarasca correspondiente al área de muestreo, en este caso 0.75 m<sup>2</sup>.

Posteriormente, se proyectó este resultado para ser expresado en valores de biomasa por hectárea de la manera siguiente:

$$B_{Th} = PH_c \times MS / A_m \times k \quad [Ec. 3]$$

Donde:  $B_{Th}$  = Biomasa total de hojarasca en t / ha;  $PH_c$  = Peso húmedo en campo homogenizado (t);  $MS$  = Materia seca expresado en decimales;  $A_m$  = Área de muestreo (0.75 m<sup>2</sup>);  $K$  = Constante de conversión a hectáreas (10000 m<sup>2</sup>)

Al mismo tiempo, se colectó una muestra de suelo por profundidad (0-30 y 30-60 cm) para la estimación de su densidad aparente (15 cm prof.) y el porcentaje de carbono orgánico. Los valores de la densidad aparente del suelo fueron obtenidos mediante la técnica del cilindro de volumen conocido, mientras que para la estimación del contenido de carbono en los suelos, se realizaron análisis siguiendo la metodología de Walkly-Black (Black *et al* 1965) en el laboratorio de análisis de suelo-agua-planta de la Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se calculó el contenido de carbono almacenado en toneladas por hectárea con la siguiente ecuación:

$$COS = D_A \times CO \times P_m \times K \quad [Ec. 4]$$

Donde:  $COS$  = Carbono orgánico del suelo (t / ha);  $D_A$  = Densidad aparente del suelo (t/m<sup>3</sup>);  $CO$  = Carbono orgánico del suelo expresado en decimales;  $P_m$  = Profundidad del muestreo (m);  $K$  = Constante de conversión a hectáreas (10000 m<sup>2</sup>).

#### 4.7 Recuperación de los bosques intervenidos en términos de almacenamiento de carbono.

##### a) Estimación del área de claro por tumba de individuos aprovechables

Se midió el largo total del claro de tumba (excluyendo los dos tramos iniciales) y se seccionó en tramos de cuatro metros cada uno, midiendo perpendicularmente el ancho del claro por sección. Con esto se creó una estructura de “espina de pescado” bien definida cuyo último tramo era de dimensión variable (Figura 2).

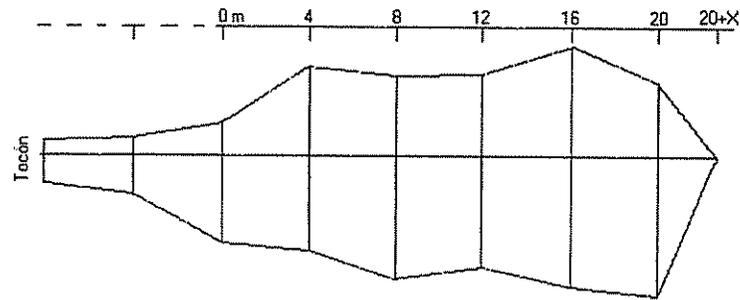


Figura 2. Estructura de “espina de pescado” para la estimación de claros de tumba

El criterio adoptado para fijar los límites de los claros de tumba fue extender la cinta métrica hasta donde la luz penetraba total y verticalmente hasta el suelo.

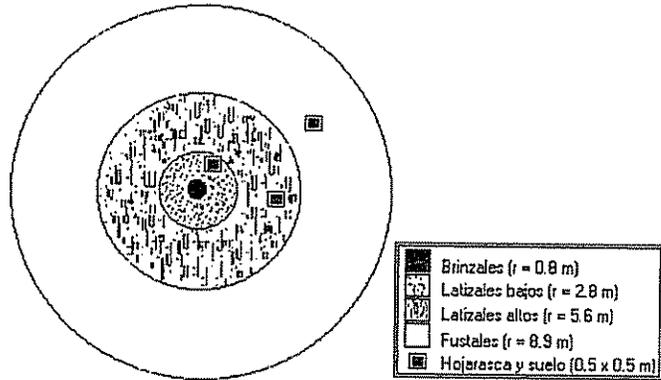
El cálculo matemático para estimar el área del claro se hizo formando figuras geométricas (triángulos y rectángulos) dentro del área intervenida. La suma de las áreas de cada figura geométrica constituyó el área total del claro.

El área disturbada por la red de caminos fue tomada de Bámaca (2002).

##### b) Parcelas de regeneración natural

Para la evaluación de la recuperación de la biomasa en bosques ya aprovechados (POAs 1998 – 2001), se procedió a levantar información de regeneración natural establecida en parcelas de muestreo distribuidas en caminos de arrastre y claros de tumba.

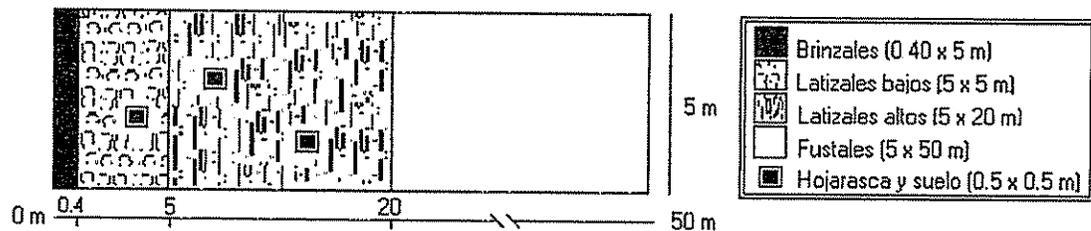
El área de las parcelas se mantuvo constante, es decir  $250 \text{ m}^2$  ubicando subparcelas dentro de ésta para el registro del diámetro por tipo de vegetación. Únicamente en el área de claros, la unidad muestral fue demarcada en forma circular por facilidad práctica (Figura 3).



**Figura 3. Esquema de la parcela de muestreo para el estudio de la regeneración natural establecida en claros de tumba**

El ancho de los caminos de arrastre fue definido en 5 m como promedio y fue usado como base para el cálculo de las dimensiones de la parcela en general, de tal manera que se cumpliera con el área establecida inicialmente. En acuerdo a ello, se definió un largo de 50 m para muestreo de fustales; 20 m para el registro de latizales altos; 5 m para latizales bajos y 0.40 m para brinzales (Figura 4).

El muestreo de regeneración natural fue complementado con muestreo de suelo y hojarasca en claros de tumba y vías de arrastre, siguiendo la metodología expuesta anteriormente.



**Figura 4. Esquema de la parcela de muestreo para el estudio de la regeneración natural establecida en caminos de arrastre**

### c) Transectos

Se trazó un transecto por cada POA con 10 m de ancho y de largo variable según fuese la longitud de cada Poa en particular resultando en las siguientes áreas muestreadas: "Desertados", 3 ha; "Zorro", 0.73 ha; "Catrachas", 1.7 ha; "-sin nombre-", 2 ha; "Tigre", 1.55 ha; y "Tanque", 1.50 ha.

En todos los transectos se registró la variable Dap de los individuos de al menos 20 cm dap, así como su nombre común.

El objetivo de recabar éstos datos fue la comparación de ésta información, con la generada en las parcelas de muestreo. Sin embargo, en el presente estudio únicamente se utilizaron los datos obtenidos en el POA "Desertados" para compararlos con los resultados de fustales mayores a 20 cm dap de las 18 parcelas de muestreo; esto, en términos de biomasa aérea total.

#### **4.8 Análisis de laboratorio y gabinete**

##### **4.8.1 Estimación de materia seca en las submuestras**

Se determinó el contenido de humedad de las submuestras y su peso en base seca mediante diferencias de pesos después de someter las muestras al horno a 60° C durante un rango de 24 a 72 horas, según lo requería el órgano vegetal en particular así: Hojas y hojarasca durante 24 horas; ramillas, tallos y ramas delgadas durante 48 horas; y ramas y tallos gruesos por 72 horas.

La ecuación general para la obtención del porcentaje de materia seca fue:

$$\%MS = (PS/PH) * 100 \quad [Ec. 5]$$

Donde: % MS = Materia seca en porcentaje; PS = Peso seco de la submuestra (g); PH = Peso húmedo en campo (g)

##### **4.8.2 Estimación de la gravedad específica de árboles aprovechables**

Para calcular la gravedad específica se utilizaron las normas del ASTM (1983), que consisten en secar en un horno a una temperatura de 105°C hasta llevarlas a peso constante. Luego se impermeabilizó con parafina y se sumergieron en agua.

Para estimar la gravedad específica (o densidad básica) se utilizó la siguiente ecuación general:

$$DB = PSH / VM; \quad [Ec. 6]$$

Donde: DB = Densidad básica (g/cc) de la pieza de madera - tocón, fuste o rama - ; PSH= Peso seco al horno (g); VM<sub>SP</sub> = Volumen de la muestra (cc).

#### 4.8.3 Estimación de biomasa aérea total y carbono

Para obtener la biomasa se utilizaron como factores de conversión el porcentaje de materia seca (Ec.5) y gravedad específica de la madera (Ec.6) transformando el peso húmedo de la muestra total en campo (fuste, ramas y hojas) o el volumen (tocón, fuste o ramas). Las ecuaciones generales utilizadas son las siguientes:

$$B_T = PH_c \times MS \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde:  $B_T$  = Biomasa (t) del componente;  $PH_c$  = Peso húmedo total en campo (t);  $MS$  = Porcentaje de materia seca expresado en decimales.

$$B_T = V \times DB \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde:  $B_T$  = Biomasa (t) del componente;  $V$  = Volumen total ( $m^3$ );  $DB$  = Densidad básica

Habiéndose obtenido la biomasa por componente, la suma constituye la biomasa aérea total por individuo. Las sumas algebraicas para obtener los valores de biomasa por medio de materia seca (Ec.9) y por medio de densidad básica (Ec.10) son las siguientes:

$$B_A = B_F + B_R + B_H \quad [\text{Ec. 9}]$$

$$B_T = B_F + B_{Rc} + B_{Rnc} \quad [\text{Ec. 10}]$$

Donde:  $B_A$ : Biomasa total por árbol (t);  $B_F$ : Biomasa de fuste (incluye tocón, fuste comercial y no comercial);  $B_R$ : Biomasa de ramas (t);  $B_H$ : Biomasa de hojas (t);  $B_T$ : Biomasa total por árbol (t);  $B_F$ : Biomasa de fuste (t);  $B_{Rc}$ : Biomasa de ramas comerciales (t);  $B_{Rnc}$ : Biomasa de ramas no comerciales

La cantidad de carbono almacenada en la biomasa en general fue estimada mediante dos métodos: Nelson y Sommer (1975) y Calorimetría (Eduarte y Segura 1999).

El muestreo se realizó en ambas unidades de muestreo y considerando los tipos de vegetación latizal bajo, latizal alto y fustales. En total se analizaron nueve muestras vegetales incluyendo fuste y ramas de dos especies (*Aspidosperma megalocarpon* y *Swietenia macrophylla*).

Los análisis fueron hechos en el laboratorio de análisis de suelo, tejido vegetal y aguas del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y en el laboratorio de nutrición animal de la Universidad Nacional de Costa Rica.

La conversión final de biomasa total a carbono se obtuvo mediante la multiplicación de un dato promedio de carbono al total de biomasa, obteniéndose de esta manera, el contenido de carbono almacenado en las muestras colectadas.

#### 4.8.4 Generación de ecuaciones alométricas

Como primera aproximación del modelo general alométrico a ser utilizado, se graficó la tendencia de las variables independientes (Dap, altura total y altura comercial) y la variable dependiente (biomasa aérea total). Se observó la correlación entre las variables a través del coeficiente de correlación de Pearson. Los modelos alométricos fueron estimados mediante el software Statistical Analysis System (SAS).

Del conjunto de ecuaciones de regresión generadas, se eligió el mejor ajuste según criterios estadísticos.

En general, se eliminaron algunas ecuaciones mediante la siguiente secuencia<sup>6</sup>:

1. Lógica biológica del modelo
2. Coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  ajustado)
3. Valor de "F" en el Andeva y la probabilidad ( $Pr > F$ ) para el modelo y los parámetros.
4. Cuadrado medio el error (CME)
5. Índice de Furnival (IF)<sup>7</sup>

Excluyéndose el coeficiente de determinación ajustado, el criterio general de selección de la ecuación consistía en identificar a aquél cuyo índice de Furnival (Furnival 1961) tendía a cero.

Las ecuaciones alométricas escogidas se aplicaron al marco muestral de la investigación dependiendo del tipo de vegetación, así:

- a) Árboles aprovechables (mayores al DMC): se enfocaron principalmente a las especies de grupos comerciales de alta demanda actual en el mercado nacional o internacional. Entre las especies más comunes que se incluyen están *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Lonchocarpus castilloi* y *Calophyllum brasiliense* para ambas unidades de manejo; y los diámetros mínimos de corta utilizados son: 50 cm para especies secundarias y 60 cm para especies primarias como el cedro y caoba.
- b) Fustales en general: aquí ya se incluyen los individuos fustales como tal, es decir todos los individuos mayores a 10 cm dap. Con esto, se aumenta a 15 el número de especies.
- c) Regeneración natural establecida: únicamente se utilizaron los datos observados en las unidades muestrales del cuadrante "C", POA 2002 de la unidad de manejo "Río Chanchich".
- d) Vegetación en general: corresponde a la generación de una ecuación de biomasa total aplicable a cualquier clase de vegetación, sea esta brinzales, latizales o bien, fustales.

---

<sup>6</sup> Tomado de Ferreira (1990), Prodan *et al* (1997) y Segura y Venegas (1999)

<sup>7</sup> El Índice de Furnival (Furnival 1961) es considerado como una desviación estándar transformada, en este caso, a unidades de biomasa aérea total. Se utiliza como criterio de elección entre un grupo de ecuaciones de regresión ajustadas y otro grupo de ecuaciones no ajustadas, por considerarse que las desviaciones estándar de las variables dependientes están expresadas en diferentes unidades (Ferreira 1990)

Para el caso particular de los árboles aprovechables, fue necesario la generación de una ecuación de regresión cuya variable dependiente fuese la biomasa total de ramas sin potencial comercial.

Se utilizaron los datos observados en el POA "El Tigre" por Aguilar (2002) de la biomasa de ramas menores de 20 cm de diámetro para 27 árboles aprovechados correspondientes a las especies *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Lonchocarpus castilloi* y *Calophyllum brasiliense*.

Esto resultó en una submuestra de 42 individuos para la unidad de manejo "Uaxactún" y de 17 individuos para "Río Chanchich", todos entre 50 cm y 125 cm dap.

Observando la relación entre las variables dependiente e independiente, se tuvo una amplia gama de posibles ecuaciones a seleccionar, sin embargo, por razones estadísticas, simplicidad y lógica, se utilizó el modelo genérico que se expresa como sigue:

$$Y = a + b_1(X_1^2) + b_2(X_2) \quad [\text{Ec. 11}]$$

Donde: Y = biomasa de ramas sin potencial comercial (t); a = valor de intercepto;  $b_1$  = Valor de la pendiente de la curva  $X_1$ ;  $X_1$  = DAP (cm);  $b_2$  = Valor de la pendiente de la curva  $X_2$ ;  $X_2$  = Altura total (m).

El número de fustales cuya biomasa de ramas no comerciales no fue estimada en campo ascendió a 40 para la unidad de manejo "Río Chanchich" y a 35 para "Uaxactún" para un total de 75 individuos.

A partir de esta información, se procedió a generar una ecuación de regresión para estimar biomasa de individuos fustales mayores al DMC.

El modelo general es como sigue:

$$\text{Log}_{10}(Y) = a + b_1(X_1) \quad [\text{Ec. 12}]$$

Donde:  $\text{Log}_{10}(Y)$  = variable dependiente transformada; a = intercepto;  $b_1$  = pendiente de la curva  $X_1$ ;  $X_1$  = variable independiente.

Al mismo tiempo, se generaron tres ecuaciones de regresión para tipos de vegetación más general. Estas ecuaciones corresponden a la forma:

$$\text{Log}_{10}(Y) = a + b_1(\text{Log}_{10} X_1) \quad [\text{Ec. 13}]$$

Donde:  $\text{Log}_{10}(Y)$  = variable dependiente transformada; a = intercepto;  $b_1$  = pendiente de la curva  $X_1$ ;  $\text{Log}_{10} X_1$  = variable independiente transformada.

A manera de validación de las ecuaciones de regresión generadas, se procedió a compararlas con ecuaciones propuestas por otros autores (Brown *et al* 1989, Segura y Kanninen 2001). Además, se realizaron pruebas de precisión con bases de datos del transecto y del inventario forestal general de la unidad de manejo "Río Chanchich".

## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

### 5.1 Análisis de la abundancia y composición del bosque

El muestreo de la vegetación (18 unidades muestrales) realizado en el cuadrante "C" del POA "Desertados", reporta un total de 964 individuos distribuidos en brinzales, latizales y fustales. Los valores promedio de las variables primarias del total de individuos muestreados figuran en el Cuadro 5.

**Cuadro 5. Información general del muestreo de la vegetación (n=18 parcelas) en el cuadrante "C", POA 2002 en la unidad de manejo "Río Chanchich"**

Tipo de vegetación	Variables			
	N	No. sp.	Dap (cm)	Ht (m)
Brinzales	360 (37)	56	0.59	1.15
Latizales bajos	137 (14)	33	2.64	4.12
Latizales altos	133 (14)	37	7.16	10.07
Fustales	334 (35)	62	19.17	18.07

N = Número de individuos total (% del total); No. sp = Número de especies;  
Dap = Diámetro a la altura del pecho promedio; Ht = Altura total promedio.

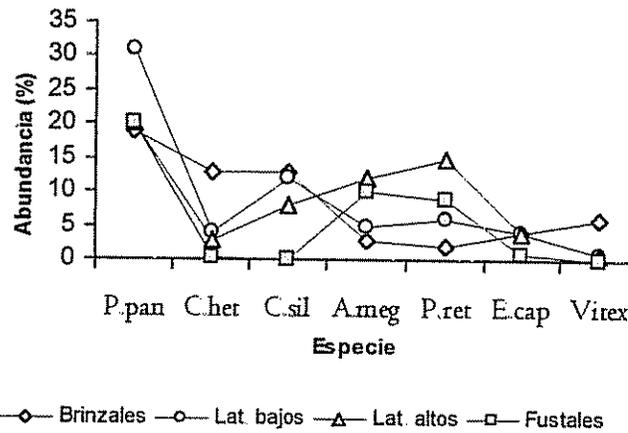
Al analizar la composición general del bosque muestreado por categoría de vegetación, se observa un aporte importante individual en brinzales y fustales (72% del total). Los fustales presentan un número menor de individuos respecto a brinzales y prácticamente aportan la misma cantidad de especies en el muestreo.

El muestreo de las 18 parcelas reporta además que existen únicamente tres fustales (1% del total) que sobrepasan los 50 cm dap. La gran mayoría se concentra en la clase diámetrica entre 10 y 50 cm dap, de ahí que el promedio de diámetro reportado para ésta categoría sea tan bajo (19 cm dap).

Los resultados de abundancia y composición en latizales difieren de aquellos reportados para brinzales y fustales. La proporción de latizales respecto al resto de vegetación observada es de 28% en lo referente al número de individuos total y de alrededor de 60% para la composición. La variabilidad entre categorías de vegetación podría estar ligado al efecto de la intensidad de muestreo en el inventario.

En el muestreo se reportan 360 brinzales distribuidos en un total de 59 especies, la mayoría sin importancia comercial.

De este total de individuos, el 19% (68 individuos) lo constituye la especie *Pseudolmedia panamensis*, considerada con potencial comercial; el 26 % (93 individuos) lo constituyen únicamente dos especies en igual proporción (*Colubrina hetereneura* y Café silvestre (no identificada –“n/i”<sup>8</sup>); el 10% (36 individuos) lo ocupan las especies *Eugenia capuli* y *Vitex* sp. El porcentaje restante (45.3%, 163 individuos) lo ocupan especies que individualmente representan menos de 5% del total (Figura 5).



**Figura 5. Distribución de la abundancia (%) de especies dominantes en la vegetación según muestreo general**

Según la clasificación de importancia comercial para Petén (CONAP 1996), este bosque reporta siete especies de brinzales con potencial comercial; cinco especies con mercado nacional, dos especies vedadas y una especie con mercado internacional – *Swietenia macrophylla*–; el resto son especies sin valor comercial.

Respecto a los latizales bajos, el inventario muestra que la abundancia aunque tiende a reducirse (137 individuos distribuidos en 35 especies), siempre se mantiene la mayor ocupación de una especie sobre el resto. De esta forma, *Pseudolmedia panamensis* se presenta como más abundante con un 31% (43 individuos) seguido de Café silvestre (n/i) con 12% (17 individuos), *Protium reticulata* y *Aspidosperma megalocarpon* con 6 y 5% respectivamente. El porcentaje restante está representado por individuos cuya abundancia individual no sobrepasa el 5% (62 individuos de 31 especies diferentes) (Figura 5).

<sup>8</sup> En adelante "n/i", constituyen los individuos cuyo nombre científico se desconoce

Dentro de esta distribución, se reporta una especie –*Swietenia macrophylla*- con posibilidades de mercado internacional; tres especies cuyo mercado base es el nacional; cuatro especies con potencial de mercado y dos especies vedadas. El resto corresponde a especies sin valor comercial.

Las categorías de vegetación anteriores presentan similares resultados que para el caso de los latizales altos (Figura 5). La especie *Pseudolmedia panamensis* es también la más abundante con un 20% tomando en cuenta que es representada por 26 individuos de un total de 133 (38 especies). Las especies *Protium reticulata*, *Aspidosperma megalocarpon* y Café silvestre representan el 31% (41 individuos) y únicamente se mantiene más o menos constante el número de especies cuya abundancia no sobrepasa individualmente el 5 %. En este caso, se tienen 66 individuos distribuidos en 33 especies (47% del total).

Los fustales que reporta el inventario comprenden un total de 334 individuos representando alrededor de 60 especies. Igualmente, la especie *Pseudolmedia panamensis* presenta la mayor abundancia con 66 individuos ocupando un 20%, seguido de dos especies, *Aspidosperma megalocarpon* y *Protium reticulata*, que agrupados conforman el 19 % del total con 62 individuos. El resto de la población de fustales lo conforman individuos cuyo porcentaje individual rara vez alcanza el 7% pero en común se agrupan para ocupar el 66% con 206 individuos (Figura 5).

Comercialmente, los grupos de especies con mercado nacional y potencial se encuentran representados por aproximadamente el mismo número de individuos. Únicamente la especie *Swietenia macrophylla* es representativa de las especies con mercado internacional.

## 5.2 Análisis de las variables dasométricas del bosque

Del total de individuos reportados en el inventario (964 individuos), 300 individuos (31%) conformaron la submuestra para la estimación de biomasa y carbono mediante métodos directos e indirectos. El cuadro 6 muestra las variables dasométricas por tipo de vegetación en esta submuestra.

**Cuadro 6. Resumen de variables dasométricas de individuos que conforman la submuestra en el estudio**

Unidad de manejo	Tipo de vegetación								
	Brinzales		Latizales bajos		Latizales altos		Fustales		
	N	AB	N	AB	N	AB	N	AB	Vol
"Río Chanchich"	81	0.003	29	0.019	51	0.204	80	22.94	206.35
"Uaxactún"							59	16.86	139.86
TOTAL	81	0.003	29	0.019	51	0.204	139	39.80	346.22

N: Número de individuos total en la submuestra; AB: Área basal (m<sup>2</sup>) total; Vol: Volumen (m<sup>3</sup>) según la ecuación de la FAO (UNEPET 1992)

El área efectiva de muestreo<sup>9</sup> de la vegetación difiere dependiendo de la categoría y ejerce influencia sobre las proyecciones a hectárea de las variables dasométricas del bosque. Los resultados de estas proyecciones se observan en el Cuadro 7.

**Cuadro 7. Estimaciones estadísticas de las variables dasométricas por hectárea de la vegetación en la unidad de manejo "Río Chanchich"**

Estadístico	Categoría de vegetación								
	Brinzales		Latizales bajos		Latizales altos		Fustales		
	N	AB	N	AB	N	AB	N	AB	Vol
Total/ha	25000	0.893	3044	1.900	739	3.088	742	27.024	179.4
Promedio/ha	1389	0.050	169	0.106	41	0.172	41	1.501	9.967
D.E.	8.71	0.0004	4.30	0.003	3.05	0.012	4.72	0.248	1.851
CV	1	1	3	3	7	7	11	17	19
E.E.	2.05	0.0001	1.01	0.001	0.72	0.003	1.11	0.058	0.436
E.M.	0.31	0.45	1	1	4	3	6	8	9
EMC	1385	0.05	167	0.10	40	0.17	39	1.38	9.05

N: Número de individuos/ha; AB: Área basal (m<sup>2</sup>/ha); Vol: Volumen (m<sup>3</sup>/ha) según fórmula de la FAO (UNEPET 1992); D.E: esviación estándar; CV: Coeficiente de variación (%); E.E: Error estándar; EM: Error de muestreo (%); EMC: Estimación mínima confiable al 15%.

### 5.2.1 Abundancia por hectárea

Existe una alta proporción de brinzales en promedio para una hectárea y una diferencia muy marcada respecto al resto de categorías de vegetación, principalmente latizales altos y fustales – distribución típica "J" invertida-. Estos resultados podrían dejar a la vista una alta competencia interespecífica e intraespecífica, así como una alta tasa de mortalidad.

A nivel de categoría de vegetación individual puede juzgarse una baja variabilidad dentro de brinzales y latizales; los fustales presentan solamente un 11% de variabilidad de datos respecto al número de individuos por hectárea.

La confiabilidad de los datos a este nivel (No. ind/ha) puede considerarse como aceptable considerando que se reporta un error de muestreo menor al 8%. Por lo tanto, a un 95% de confianza podría situarse una frecuencia promedio mínima de individuos por hectárea para brinzales de 1385; para latizales bajos de 167; para latizales altos de 40 y para fustales de 39, los cuales son datos contenidos dentro de los límites de confianza.

<sup>9</sup> En las estimaciones por hectárea, el área efectiva de referencia depende de la categoría de vegetación así: Brinzales, 0.0144 ha; latizal bajo, 0.045 ha; latizal alto, 0.18 ha y Fustales 0.45 ha.

### 5.2.2 Area basal por hectárea

A pesar de presentar un número de individuos por hectárea superior al resto de categorías de vegetación, el análisis del área basal de los brinzales denota que estos individuos ocupan una mínima parte dentro del bosque en general ( $0.89 \text{ m}^2/\text{ha}$ ). Y por el contrario, los fustales que presentaban un número de individuos menor ahora presentan una alta ocupación dentro del dosel del bosque debido al efecto del diámetro ( $27.02 \text{ m}^2/\text{ha}$ ).

La regeneración natural establecida incluye individuos cuya área basal mantiene poca variabilidad (del orden de 1 al 7%). Puede concluirse con alta confiabilidad que a un 15% de desviación fuera de la media muestral, el valor que representa a la población se encuentra muy cercano a  $0.32 \text{ m}^2/\text{ha}$  con una probabilidad de 95%.

### 5.2.3 Volumen por hectárea

Los datos de volumen de fustales expresan una baja variabilidad, cercana a 20%, debido quizá al rango de clases diamétricas que incluye.

Un promedio aceptable de volumen por hectárea es de  $9.97 (\pm 1.851) \text{ m}^3/\text{ha}$ , pero un análisis de límites de confianza (95%) sugiere que el valor promedio por hectárea se encuentra entre  $9.05$  y  $10.89 \text{ m}^3/\text{ha}$ .

Los datos observados en el muestreo relacionados a la abundancia, composición, área basal y volumen de la vegetación concuerdan con los datos reportados por NPV (2002) para el inventario forestal general de dos unidades de manejo (Cuadro 8).

**Cuadro 8. Variables dasométricas de la vegetación para dos unidades de manejo según NPV (2002)**

Variable (*)	Unidad de manejo	
	"Río Chanchich"	"Yaloch" (**)
Riqueza (No. esp.)	131	121
Abundancia (N/ha)	Brinzales	18265
	Latizales	671
Area Basal ( $\text{m}^2/\text{ha}$ )	21.80	24.30
Volumen ( $\text{m}^3/\text{ha}$ )	26.00	30.55

(\*) Riqueza y área basal corresponden a la vegetación con  $\geq 10 \text{ cm dap}$ ; Volumen para fustales  $\geq 25 \text{ cm dap}$ .

(\*\*) La UM "Yaloch" limita con la UM "Río Chanchich" al N

### 5.3 Estimación de gravedad específica y fracción de carbono

#### 5.3.1 Gravedad específica

El promedio obtenido en "Río Chanchich" fue de 0.65 (D.E. = 0.097, n = 27) y para "Uaxactún" de 0.70 (D.E.= 0.080, n = 36). Entre ambas unidades de manejo se encontraron diferencias estadísticamente significativas (gl = 62; Pr > t = 0.021).

Evaluando la muestra (n = 63) en general, se tiene que la unidad de manejo "Río Chanchich" presenta datos de gravedad específica en un rango de 0.52 y 0.77, mientras que "Uaxactún" en un rango de 0.59 y 0.76. Esto sitúa a "Río Chanchich" como la unidad de manejo con datos más bajos de gravedad específica comparado con el promedio de gravedad específica de "Uaxactún" (Cuadro 9).

**Cuadro 9. Resultados de gravedad específica por especie en las unidades de manejo**

Especie	Unidad de manejo					
	"Río Chanchich"			"Uaxactún"		
	N	G.E.	D.E.	N	G.E.	D.E.
<i>Swietenia macrophylla</i>	2	0.62	0.007	15	0.72	0.064
<i>Lysiloma</i> spp.	1	0.74	-	1	0.72	-
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	3	0.77	0.149	9	0.76	0.055
<i>Calophyllum brasiliense</i>	15	0.67	0.079	7	0.66	0.046
<i>Vochysia hondurensis</i>	2	0.52	0.055	-	-	-
<i>Terminalia amazonia</i>	4	0.56	0.042	-	-	-
<i>Cedrela odorata</i>	-	-	-	4	0.59	0.048
TOTAL	27	0.70	0.080	36	0.65	0.097

N: Número de muestras; G.E.: Gravedad específica en promedio; D.E.: Desviación estándar

A nivel de órgano colectado, se obtuvieron 34 muestras de tocón y 29 muestras de ramas. Las muestras de tocón presentan un dato de gravedad específica promedio de 0.68 ( $\pm$  0.099) y las muestras de ramas un promedio de 0.68 ( $\pm$  0.078). Dado a que en promedio no hay variaciones, no se reportan diferencias estadísticamente significativas (gl = 62; Pr > t 0.962). (Cuadro 10). Esto sugiere que para las estimaciones de biomasa a través de volumen, puede utilizarse indistintamente el dato de tocón o de rama, o bien el promedio de ambos.

**Cuadro 10. Resultados de gravedad específica promedio en ambas unidades de manejo según órgano**

Especie	Órgano muestreado						Promedio ponderado		
	Rama			Tocón					
	N	G.E.	D.E.	N	G.E.	D.E.	N	G.E.	D.E.
<i>Terminalia amazonia</i>	1	0.52	-	3	0.57	0.040	4	0.56	0.042
<i>Swietenia macrophylla</i>	7	0.68	0.066	10	0.72	0.077	17	0.71	0.067
<i>Cedrela odorata</i>	1	0.53	-	3	0.61	0.048	4	0.59	0.048
<i>Lysiloma spp.</i>	1	0.74	-	1	0.72	-	2	0.73	0.010
<i>Lonchocarpus castilloi</i>	7	0.76	0.076	5	0.78	0.082	12	0.77	0.079
<i>Vochysia hondurensis</i>	1	0.55	-	1	0.48	-	2	0.52	0.055
<i>Calophyllum brasiliense</i>	11	0.66	0.065	11	0.67	0.064	22	0.67	0.063
Promedio general	29	0.68	0.078	34	0.68	0.099	63	0.68	0.089

N: Número de muestras analizadas; G.E: Gravedad específica en promedio; D.E: Desviación estándar.

Analizando el rango general de gravedad específica encontrado en ambas unidades de manejo y comparándolo con datos de estudios en bosques primarios del trópico (Cuadro 11), se tiene una variación fuerte principalmente en la estimación de un dato promedio de las especies *Swietenia macrophylla*, *Lonchocarpus castilloi*, *Vochysia hondurensis* y *Calophyllum brasiliense* debido quizá a la variabilidad biosfísica del área de los bosques evaluados por los autores, o bien, a los procedimientos metodológicos de análisis y muestreo.

**Cuadro 11. Gravedad específica para árboles de bosques tropicales, varias fuentes**

Especie	Datos observados			Aguilar (2002)			Otros autores (paréntesis, literatura citada)
	N	G.E.	D.E.	N	G.E.	D.E.	
<i>S. macrophylla</i>	17	0.71	0.067	20	0.64	0.07	0.45–0.46 (c, d, e)
<i>L. castilloi</i>	12	0.77	0.079	14	0.86	0.07	0.86 (a)
<i>C. odorata</i>	4	0.59	0.048	12	0.48	0.09	0.33–0.43 (c, d, e)
<i>C. brasiliense</i>	22	0.67	0.063	8	0.68	0.04	0.47–0.52 (b, c, d, e, f)
<i>T. amazonia</i>	4	0.56	0.042	-	-	-	0.52–0.68 (c, d, e, f)
<i>V. hondurensis</i>	2	0.52	0.055	-	-	-	0.34–0.42 (c, d, e)
<i>Lysiloma spp.</i>	2	0.73	0.010	-	-	-	-
TOTAL	63			54			

N: Número de observaciones; G.E: Gravedad específica promedio; D.E: Desviación estándar de la media.

(a) Echenique 1970; (b) López et al 1987; (c) Benítez y Montesinos 1988; (d); Carpio 1992; (e) Herrera y Morales 1993; (f) Carpio et al 1996

Una comparación entre los datos observados en este estudio y los de Aguilar (2002) en Uaxactún, pone de manifiesto que la unidad de manejo "Río Chanchich" presenta valores más bajos de gravedad específica para las especies *Lonchocarpus castilloi* y *Calophyllum brasiliense*. Las especies *Swietenia macrophylla* y *Cedrela odorata* reporta un valor mayor en la unidad de manejo "Uaxactún" (Cuadro 9).

Al mismo tiempo, esta comparación reporta diferencias estadísticamente significativas para las especies *Swietenia macrophylla* ( $Pr > t$  0.0072; CV=10%), *Cedrela odorata* ( $gl=14$   $Pr > t$  0.045; CV=17%) y *Lonchocarpus castilloi* ( $gl=24$ ;  $Pr > t$  0.0027; CV=9%). La especie *Calophyllum brasiliense* no reportó diferencias estadísticamente significativas ( $gl=28$ ;  $Pr > t$  0.583; CV=9%).

### 5.3.2 Fracción de carbono

Los análisis de la fracción de carbono mostraron un promedio general de 0.50.

Al evaluar los dos métodos de análisis utilizados no se detectaron diferencias estadísticas significativas ( $gl = 16$ ;  $Pr > F$  0.412) al igual que entre categorías de vegetación (CV = 5%; CME = 2.33;  $Pr > F$  0.073).

Las estimaciones en tocones resultaron en 0.50 ( $\pm 1.229$ ,  $n = 4$ ) y en ramas en 0.50 ( $\pm 4.790$ ,  $n = 4$ ) (Cuadro 12).

**Cuadro 12. Resultados de fracción de carbono de la vegetación en las unidades de manejo**

Especie	Categoría de vegetación	Organo	Metodología de análisis (*)		Promedio
			Nelson y Sommer	Calorimetría	
<i>A. megalocarpun</i>	Latizal bajo	Tocón	48	48	48
<i>A. megalocarpun</i>	Latizal bajo	Rama	46	46	56
<i>A. megalocarpun</i>	Latizal bajo	Hojas	52	53	52
<i>A. megalocarpun</i>	Latizal alto	Rama	55	57	56
<i>A. megalocarpun</i>	Fustal	Tocón	50	54	51
<i>A. megalocarpun</i>	Fustal	Rama	46	47	46
<i>A. megalocarpun</i>	Fustal	Rama	52	48	50
<i>S. macrophylla</i>	Fustal	Tocón	49	53	51
<i>S. macrophylla</i>	Fustal	Tocón	49	51	50

(\*) Nelson y Sommer (1975); Eduarte y Segura 1999

El dato observado del contenido de carbono en la vegetación en estudio se considera válido dado que concuerda con lo reportado por varios autores en bosques tropicales (Ciesla 1995, Soliz 1998, Malhi y Grace 2000, Snowdon *et al* 2001).

De igual forma, Segura (1999) reporta un rango de 0.43 – 0.47 ( $n = 23$ ;  $Prob > X^2$  0.264) en un bosque natural de Costa Rica y Aguilar (2002) reporta un promedio de 0.48 ( $\pm 0.048$ ;  $n = 11$ ), valores cercanos a lo obtenido en el presente estudio.

#### 5.4 Estimación de biomasa aérea total y carbono en la vegetación

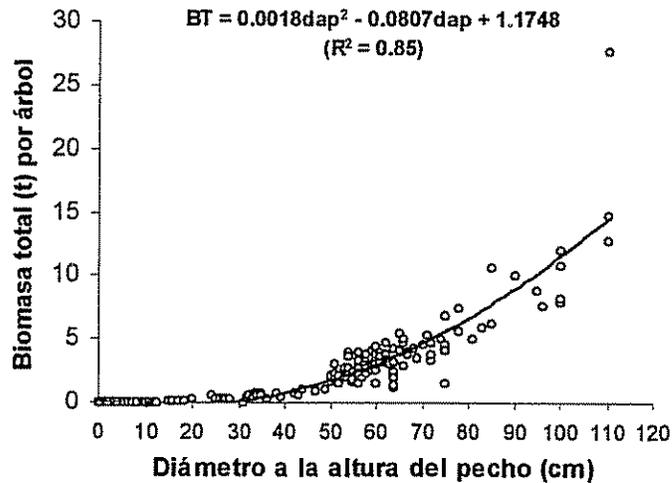
Para ambas unidades de manejo, la submuestra seleccionada para la estimación de biomasa fue de 300 individuos, conformada por todas las categorías de vegetación.

En esta submuestra se encontró un total<sup>10</sup> de 57.08 t de biomasa en "Río Chanchich" y un total de 35.25 t de biomasa en "Uaxactún". Se encontró también que las categorías de vegetación brinzales y latizales aportan una mínima parte (<1%) al total de biomasa (Cuadro 13 y Figura 6).

**Cuadro 13. Resultados de biomasa total (t) por componentes de los árboles muestreados**

Unidad de manejo	Var.	Categoría de vegetación														Total
		B	LB	LA	Fustales por clase diamétrica (cm)											
					10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	>110	
"Río Chanchich"	N	81	29	51	9	7	6	2	24	12	10	3	2	2	3	241
	BF	6x10 <sup>-5</sup>	0.001	0.012	0.05	0.22	0.37	0.50	1.85	2.52	3.28	4.99	7.46	7.59	13.9	42.77
	BR	5x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-4</sup>	0.003	0.02	0.13	0.29	0.41	0.43	0.65	1.42	2.61	2.00	1.83	4.52	14.32
	BH	3x10 <sup>-5</sup>	2x10 <sup>-4</sup>	1x10 <sup>-3</sup>												0.001
	BT	0.00014	0.0013	0.016	0.08	0.38	0.68	0.95	2.28	3.17	4.70	7.61	9.46	9.42	18.4	57.09
"Uaxactún"	N						6	4	20	22	3	1	1	2	59	
	BF						0.26	0.56	2.10	2.65	3.02	3.95	5.76	7.80	26.11	
	BR						0.19	0.35	0.68	0.90	1.69	1.12	1.93	2.29	9.15	
	BT						0.42	0.93	2.79	3.55	4.71	5.07	7.69	10.1	35.25	

Var: Variable estimada; N: Número de individuos muestreados; BF: Biomasa promedio de fustes (t); BR: Biomasa promedio de ramas (t); BH: Biomasa promedio de hojas (t); BT: Biomasa total por árbol (t); B: Brinzales; LB: Latizales bajos; LA: Latizales altos

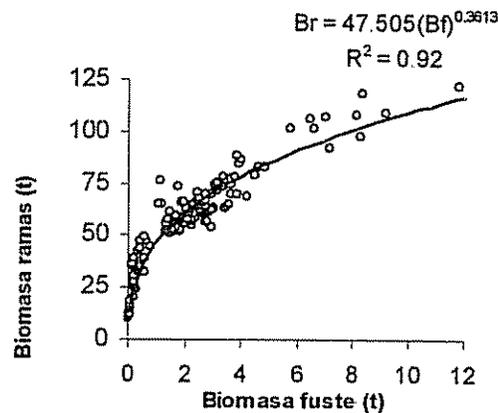


**Figura 6. Relación de la biomasa total por árbol y el Dap de los árboles muestreados**

<sup>10</sup> No incluye el aporte de la biomasa de hojas en latizales y brinzales (0.001 t)

Según se observa en la Figura 6, existe una alta correlación entre las variables dap y biomasa ( $r = 0.85$ ;  $gl = 299$ ;  $Pr > r : < 0.0001$ ) lo cual contrasta con lo observado por Aguilar (2002) en un área de aprovechamiento contiguo al área de estudio actual en "Uaxactún" ( $r = 0.94$ ;  $gl = 53$ ). Estos resultados muestran el comportamiento típico del efecto del Dap de los individuos sobre la biomasa total, principalmente en el rango diamétrico de 50 a 70 cm dap.

Obviamente al nivel de desarrollo en estos individuos ( $> 50$  cm dap), el efecto en el aumento en diámetro influye directamente en la ganancia de biomasa como lo aseguran Brown y Lugo (1992) y Brown y Iverson (1992) al destacar la importancia de los individuos mayores en las estimaciones de biomasa y al mismo tiempo el comportamiento geométrico del aumento de biomasa respecto al Dap de los individuos.

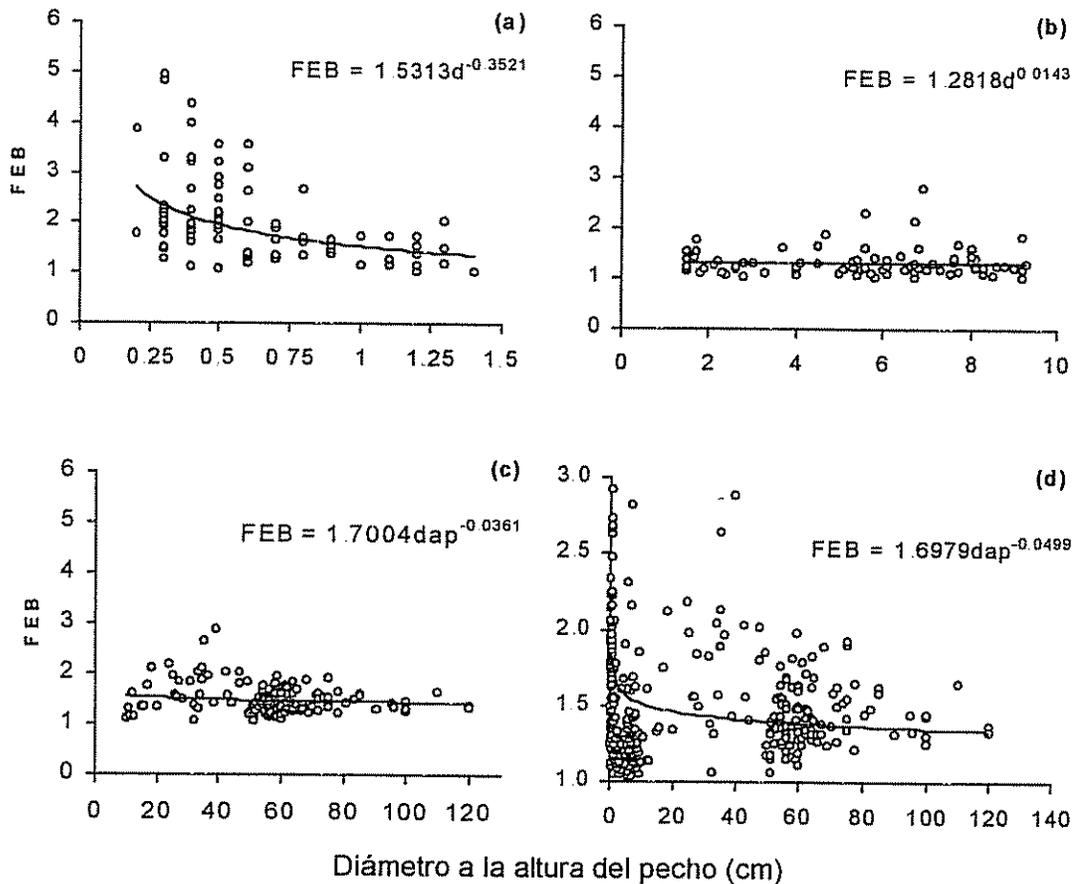


**Figura 7. Relación de la biomasa de fuste y biomasa de ramas de los árboles muestreados**

La influencia del diámetro sobre la biomasa sigue una tendencia exponencial, en la cual la ganancia de biomasa se da mayormente en el fuste a medida que el Dap se aumenta. Al mismo tiempo, la acumulación de biomasa en las ramas sigue un comportamiento contrario, esto es, a medida que se aumenta el Dap, la ganancia de biomasa en ramas se disminuye (Figura 7).

En este sentido, un análisis de la Figura 7 permite notar que del total de biomasa por árbol, aproximadamente el 20% lo constituye la biomasa de ramas y el resto lo constituye la biomasa del fuste.

Los resultados anteriores también pueden analizarse en términos del factor de expansión de biomasa (FEB), dado que este asocia la biomasa aérea total por individuo y la biomasa de su fuste (Figura 8).



**Figura 8. Relación del Factor de Expansión de Biomasa con el Dap en (a) brinzales, (b) latizales, (c) fustales y (d) vegetación en general**

Los valores encontrados de FEB para la submuestra de individuos se muestra en el Cuadro 14 y Figura 8d. El dato promedio encontrado para toda la vegetación fue de  $1.60 (\pm 0.582; n = 300)$  lo cual significa que por cada tonelada de biomasa total, se esperaría que en promedio se tuvieran 0.6 toneladas de biomasa de fuste; o lo que es lo mismo se esperaría que por ejemplo, un individuo con 3 toneladas de biomasa total, alrededor de 1.88 t fueran de fuste<sup>11</sup>, es decir aproximadamente 60%.

Respecto a categorías de vegetación, los brinzales reportan un mayor FEB ( $2.05 \pm 0.866; n = 81$ ) (Figura 8a). A partir de este dato, el FEB desciende según aumenta el diámetro de los individuos observados (Figura 8d).

<sup>11</sup> Resulta de Biomasa total / FEB dado ( $3/1.6 = 1.88$  t fuste)

En este sentido, los brinzales presentaron diferencias estadísticamente significativas respecto al resto de categorías de vegetación (CV = 32%; CME = 7.69; Pr>F: <0.0001).

**Cuadro 14. Factor de expansión de biomasa por categoría de vegetación**

Categoría de Vegetación	N	FEB	D.E.
Brinzales	81	2.05	0.866
Latizales (*)	80	1.34	0.293
Fustales	139	1.50	0.288
Toda la vegetación	300	1.60	0.582

N: Número de observaciones; FEB: Valor promedio de factor de expansión de biomasa;

D.E: Desviación estándar

(\*) Incluye valores de latizales altos y latizales bajos

Por otro lado, mediante una comparación entre ambas unidades de manejo no se observaron diferencias estadísticamente significativas ( $gl = 298$ ;  $Pr > t 0.204$ ).

El factor de expansión de biomasa promedio observado (1.60) se encuentra dentro de los rangos reportados por otros autores. Por ejemplo, Segura (1999) reporta un rango de FEB de 1.3 y 2.2 para siete especies forestales de Costa Rica; mientras que Aguilar (2002) reporta un promedio de FEB de 1.80 (1.51-2.15) para 17 especies de la "unidad de manejo "Uaxactún".

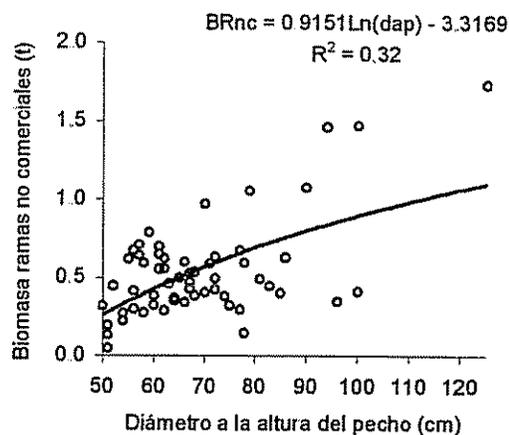
Por su parte, Brown y Lugo (1984, 1992), Brown y Iverson (1992) y Brown *et al* (1989) reportan un rango promedio de FEB de 1.55 y 1.74 para bosques húmedos basándose en en datos de inventarios, inclusive a través de ecuaciones de regresión. La variación de los datos reportados podría estar ligada al número de especies que incluye cada estudio.

#### **5.4.1 Ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa aérea total y carbono**

##### **5.4.1.1 Ramas no comerciales**

El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) para las variables independientes ( $Dap$ ,  $Ht$  y  $Hc$ ) y la biomasa de ramas no comerciales, se muestra en la Figura 9.

Ahora bien, el coeficiente de determinación ajustado para el modelo seleccionado fue de 46%, lo cual denota una baja relación entre las variables. Sin embargo, dado el número elevado de datos en la estimación ( $n = 51$ ), los grados de libertad son suficientes para considerar el modelo como apropiado para la estimación de biomasa de ramas no comerciales mediante el uso de dos variables independientes,  $Dap$  y la altura total.



**Figura 9. Grado de correlación entre las variables en la estimación de biomasa de ramas no comerciales**

El criterio adoptado para ello se basa en la comparación de datos de coeficiente de determinación ajustados tanto calculados como tabulados. Observando la tabla "valores significativos de r y R" (Steel y Torrie 1988) donde según los requerimientos se tiene que para 50 grados de libertad ( $n - 1$ ) del error de muestreo, dos variables independientes incluidos en la ecuación de regresión seleccionada y tres parámetros, el valor de probabilidad al 95% de confianza es de alrededor de 31%, el cual es menor que el dato observado (46%).

Los estadísticos generales de la ecuación seleccionada (Ec.14) se listan en el Cuadro 15.

**Cuadro 15. Ecuación de regresión para la estimación de biomasa de ramas no comerciales**

No.	Ecuación de regresión	n	R <sup>2</sup> aj. calc	R <sup>2</sup> tab	CME	CV
[Ec. 14]	$B_{rnc} = 0.49473 + 8.02 \times 10^{-5} \text{dap}^2 - 0.01531H_T$	51	46	31	0.053	43

$B_{rnc}$ : Biomasa de ramas no comerciales (t);  $dap$ : DAP (cm);  $H_T$ : Altura total (m); n: Número de observaciones; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación (%); CME : Cuadrado medio del error; CV = Coeficiente de variación (%). Todos los parámetros de la ecuación de regresión han expresado diferencias altamente significativas ( $P < 0.0001$ ).

No obstante la validez de la ecuación 14, únicamente puede utilizarse para fines de una estimación como tal y para un rango de diámetro a la altura del pecho de 50 a 125 cm.

Simultáneamente a la validación de la ecuación de regresión mencionada, fueron evaluadas otras más con la diferencia de no haberse observado una diferencia estadística significativa para el intercepto ( $Pr > 0.05$ ). Esto no sugiere sin embargo, que la ecuación no es válida para una estimación de la biomasa de ramas. Únicamente denota que el intercepto no pasa por el origen (Cuadro 16).

**Cuadro 16. Ecuaciones de regresión alternativas para la estimación de la biomasa de ramas no comerciales**

No.	Ecuación de regresión	R <sup>2</sup> aj.	CME	CV
[Ec. 15]	$B_{mrc} = 0.11975 + 0.00008435 \text{ dap}^2$	38	0.061	46
[Ec. 16]	$B_{mrc} = -0.08153 + 0.01338 \text{ dap} - 0.02313 H_c$	39	0.060	46
[Ec. 17]	$B_{mrc} = 0.05305 + 0.01215 \text{ dap}^2 - 0.01521 H_T$	43	0.057	44

B<sub>mrc</sub>: Biomasa de ramas no comerciales (t); dap: DAP (cm); H<sub>c</sub>: Altura comercial (m); H<sub>T</sub>: Altura total (m); R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación (%); CME: Cuadrado medio del error; CV = Coeficiente de variación (%).

#### 5.4.1.2 Fustales aprovechables

Se considera importante la generación de una ecuación de regresión que represente únicamente a los fustales mayores al diámetro mínimo de corta puesto que representan la mayor cantidad de biomasa en el bosque por individuo. Además, sufre transformaciones a futuro, dependiendo de los requerimientos de mercado, lo que se podría traducir en liberación o almacenamiento de carbono. Además, se hace necesaria tal ecuación con fines comparativos específicos para la información de censos comerciales.

Sin embargo, para su aplicación en otros estudios debe tomarse en cuenta la variación regional en cuanto a la definición de un diámetro mínimo de corta, en virtud de que no se tiene un número estándar por país.

Bajo ese contexto, de una serie de ecuaciones de regresión tentativas, se eligió una ecuación con aplicación sencilla y de estadísticos y medidas de ajuste confiables. Los detalles se observan en el Cuadro 17.

La correlación (r) entre las variables que incluyen las ecuaciones tentativas (biomasa total y Dap) expresan una correlación del orden de 87%, mientras que la correlación entre la biomasa total, altura comercial y total son muy bajas (25% y 2%, en forma respectiva).

Lo anterior confirma que la selección de una ecuación de regresión a partir del Dap resultará en datos no muy alejados de la media poblacional para biomasa total. Esta afirmación contrasta con lo sugerido por Brown *et al* (1989) al encontrar una tendencia a la sobreestimación en valores de biomasa mediante ecuaciones de regresión con el Dap como variable independiente y única.

**Cuadro 17. Ecuaciones de regresión propuestas para la estimación de biomasa aérea total de fustales aprovechables**

No.	Ecuación de regresión	N	R <sup>2</sup> aj.	CV	CME
[Ec. 18]	$\text{Log}_{10} (B_T) = -0.30811 + 0.01352 (\text{dap})$	105	78	19	0.011
[Ec. 19]	$\text{Log } B_T = -8.33346 + 2.32236 \ln (\text{dap})$	105	78	19	0.062
[Ec. 20]	$\text{Log } B_T = -0.70946 + 0.03112 (\text{dap})$	105	78	19	0.061

BT: Biomasa total (t); dap: DAP (cm); N : Número de observaciones; R<sup>2</sup> aj : Coeficiente de determinación ajustado (%); CV: Coeficiente de variación (%); CME: Cuadrado medio del error. El modelo y los parámetros de todas las ecuaciones fueron altamente significativos (P < 0.0001).

Se reportan tres ecuaciones alternativas; sin embargo, se prefiere la aplicación de la ecuación 18 para la estimación de biomasa total de fustales cuyo diámetro a la altura del pecho esté comprendido dentro del rango de 50 a 120 cm.

Según las pruebas de lógica del modelo, ésta ecuación de regresión tiende a subestimar un tanto el dato de biomasa, lo cual se considera preferible comparado con la sobreestimación de los datos.

Además, los estadísticos observados expresan un ajuste relativamente alto de los datos. Por ejemplo, la variabilidad de estos datos se explica en un 78% a través de la ecuación elegida, aunque se necesitarían un número mayor de datos base de biomasa o bien, afinar las técnicas de muestreo y recolección de los mismos.

#### 5.4.1.3 Fustales en general

Obviamente, en el disturbio ocasionado en la planificación del aprovechamiento forestal, se pierde una cantidad significativa de biomasa en individuos de diferentes clases diamétricas, principalmente los fustales de clases diamétricas inferiores.

Bajo este esquema, la ecuación de regresión generada a partir de los individuos en patios de acopio e individuos aprovechables constituye una aproximación al valor real de la biomasa de individuos tumbados en el proceso de acopio. Las ecuaciones de regresión generadas se muestran en el Cuadro 18.

El análisis de la correlación entre el dap y la biomasa total a través del índice de Pearson (Pr > r 0.0001; r = 0.84), refleja un alto grado de asocio aún cuando se ha disminuido en tres unidades respecto a aquel reportado para los fustales aprovechables.

Una explicación para esta disminución en el índice de Pearson se encuentra en el hecho de haberse agregado una submuestra muy pequeña de fustales de 10 a 50 cm dap. Además, estos individuos adicionan mayor variabilidad al análisis de acuerdo con sus variables dasométricas.

**Cuadro 18. Ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa total de fustales**

No.	Ecuación de regresión	N	R <sup>2</sup> aj.	CV	CME
[Ec. 21]	$\text{Log}_{10} (B_T) = - 4.09992 + 2.57782 \text{Log}_{10} (\text{dap})$	139	95	40	0.016
[Ec. 22]	$\text{Log} (B_T) = - 9.44041 + 2.57782 \text{Ln} (\text{dap})$	139	95	40	0.085
[Ec. 23]	$\text{Log} (B_T) = - 1.03867 + 0.02393 (\text{dap})$	139	84	69	0.048

BT: Biomasa total (t); dap: DAP (cm); N : Número de observaciones; R<sup>2</sup> aj.: Coeficiente de determinación ajustado (%); CV: Coeficiente de variación (%);CME: Cuadrado medio del error.

En el cuadro anterior se plantea la posibilidad de estimar la biomasa total de los fustales con cualquiera de las tres ecuaciones de regresión. Para efectos de la investigación se utilizó la ecuación 21, la cual muestra un coeficiente de determinación cercano a la unidad. Esto significa que la variable independiente necesita ser transformada para explicar la variabilidad del modelo en términos de biomasa total. Únicamente resta un 5% de variación que es explicada por el error de muestreo.

Todos los parámetros incluidos en las ecuaciones de regresión presentaron una alta significancia ( $Pr < 0.0001$ ) por lo tanto influyeron en mayor grado en los resultados estimados.

#### **5.4.1.4 Regeneración natural establecida**

La ecuación que se generó a partir de estos datos es también del tipo logarítmico. Presentó un alto coeficiente de determinación ( $R^2 \text{ aj.} = 0.89$ ;  $n = 161$ ) lo cual indica que el modelo explica la variabilidad de los datos en un 89%; el resto de la variabilidad es explicada por el error.

Igualmente la correlación de los datos incluidos en la ecuación generada mostró un índice elevado, del orden del 84% con una probabilidad ( $P < 0.0001$ ).

Tanto el modelo como los parámetros (intercepto y pendiente) resultaron altamente significativos, lo cual indica que la variación en la biomasa total se explica con precisión estadísticamente aceptable.

Como en los casos anteriores, de una gama de posibles ecuaciones fue escogida la de mejor ajuste y precisión. En el Cuadro 19 se presentan las ecuaciones generadas y que podrían ser utilizadas indistintamente para la estimación de la biomasa total de la regeneración natural establecida.

Obviamente, la ecuación escogida para la estimación es la que presenta el máximo coeficiente de determinación y menor cuadrado medio del error (Ec.27).

**Cuadro 19. Ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa total de la regeneración natural establecida**

No.	Ecuación de regresión	R <sup>2</sup> aj.	CME
[Ec. 24]	$\text{Ln} (B_T) = - 11.90503 + 2.13399 (\text{dap})$	86	1.402
[Ec. 25]	$\text{Ln} (B_T) = - 9.21858 + 2.42758 \text{Ln} (\text{dap})$	89	1.073
[Ec. 26]	$\text{Log}_{10} (B_T) = - 5.17029 + 0.92678 (\text{dap})$	86	0.264
[Ec. 27]	$\text{Log}_{10} (B_T) = - 4.00358 + 2.42758 \text{Log}_{10} (\text{dap})$	89	0.202

BT = Biomasa total (t); dap = DAP (cm); R<sup>2</sup> aj = Coeficiente de determinación ajustado (%); CME = Cuadrado medio del error.

#### 5.4.1.5 Vegetación en general

Para estas estimaciones se adicionan los individuos del grupo de regeneración natural establecida. Esto resulta en 300 individuos que al mismo tiempo adicionan una amplia variabilidad.

Con esta peculiaridad, se amplían las posibilidades de elegir ecuaciones de regresión con dos o más variables independientes. El análisis del índice de correlación lo confirma pues se observan correlaciones relativamente altas.

Por ejemplo, se observa una correlación de 84% ( $P < r 0.0001$ ) entre el Dap y la biomasa total; 90% ( $P < r, < 0.0001$ ) entre el Dap y la altura total y 62% ( $P < r, < 0.0001$ ) entre la altura total y la biomasa total.

Los criterios de elección de la mejor ecuación discriminaron el grueso de ecuaciones de regresión alternativas para únicamente validar como aceptables a cinco de ellos. De estos, fue seleccionada la ecuación 32 para cálculos posteriores (Cuadro 20).

**Cuadro 20. Ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa total de la vegetación general**

No	Ecuación de regresión	R <sup>2</sup> aj.	CME	IF
[Ec. 28]	$BT = -0.2605 + 0.00111 \text{dap}^2$	88	1.059	1.03
[Ec. 29]	$BT = 0.15264 - 0.04895 \text{dap} + 0.00167 \text{dap}^2$	91	0.828	0.91
[Ec. 30]	$\text{Ln} (B_T) = -9.37673 + 2.30119 \text{Ln} (\text{dap}) + 0.30297 \text{Ln} H_T$	97	0.599	0.002
[Ec. 31]	$\text{Ln} (B_T) = -9.22628 + 2.51389 \text{Ln} (\text{dap})$	98	0.619	0.003
[Ec. 32]	$\text{Log}_{10} (B_T) = - 4.00692 + 2.51389 \text{Log}_{10} (\text{dap})$	98	0.116	0.003

BT = Biomasa total (t); dap = DAP (cm); H<sub>T</sub> = Altura total (m); R<sup>2</sup> aj = Coeficiente de determinación ajustado (%); CME = Cuadrado medio del error; IF = Índice de Furnival. El modelo y los parámetros de todas las ecuaciones fueron altamente significativos ( $P < 0.0001$ ); la ecuación de regresión múltiple presenta problemas leves de colinealidad (C.I. < 10).

Brown *et al* (1989) sostienen que las ecuaciones de regresión basadas en el Dap como única variable de entrada podría tender a sobreestimar los resultados comparados con la inclusión de la altura total ( $H_T$ ) como segunda variable independiente. Los mismos resultados, pero en bosques tropicales secundarios fueron reportados por Nelson *et al* (1999) en donde el porcentaje de error en la estimación del peso seco se disminuía a medida que se incluían varios tipos de variables independientes en las ecuaciones de regresión.

Con el ánimo de validar esta hipótesis, se realizó una prueba de medias que comparara los datos reales y los resultados de la aplicación de la ecuación generada en este estudio (Ec.21) y dos ecuaciones de regresión utilizadas por Brown *et al* (1989) en bosques tropicales húmedos (Figura 10). El Cuadro 21 muestra los estadísticos generales de las ecuaciones y el criterio adoptado para la validación de la hipótesis.

**Cuadro 21. Comparación de ecuaciones de regresión de otros autores**

No. Ec.	Ecuación de regresión	R <sup>2</sup> aj	CME	X	Criterio <sup>(a)</sup>
[Ec. 33]	$B_T = \exp [ - 3.1141 + 0.9719 \cdot \ln (dap^2 \cdot H_T) ]$	97	0.112	0.365	a
[Ec. 21]	$\log_{10} (B_T) = - 4.09992 + 2.57782 \log_{10} (dap)$	95	0.356	0.329	a b
[Ec. 34]	$B_T = 38.4908 - 11.7883 (dap) + 1.1926(dap^2)$	78	0.062	0.263	b

(a) Ecuaciones con la misma letra son no significativamente diferentes ( $Pr > |t|$ , alfa 0.05)

Ec.: Número de ecuación; R<sup>2</sup>aj: Coeficiente de determinación ajustado; CME: Cuadrado medio del error; X: Valor medio de biomasa aérea total por individuo; B<sub>T</sub>: Biomasa total por árbol individual (10 – 130 cm dap); dap: DAP (cm); H<sub>T</sub>: Altura total (m).

Como se demuestra en el cuadro anterior, no se detectan diferencias estadísticas significativas entre las estimaciones de las ecuaciones 21 y 33 ( $Pr > |t|$ , 0.4241) y tampoco entre los resultados de las estimaciones de las ecuaciones 21 y 34 ( $Pr > |t|$  0.1060). Lo contrario ocurre si se comparan los resultados de las ecuaciones 33 y 34 de los autores; sí se presentan diferencias estadísticas significativas ( $Pr > |t|$ , 0.0243 ).

Estos resultados, además de validar la ecuación de regresión generada con datos observados en este estudio, también pone de manifiesto que el criterio de Brown *et al* (1989) no necesariamente se cumple en todos los casos. Esto se comprueba observando los valores medios expresados en el cuadro anterior, donde inclusive el valor medio de biomasa total estimado a partir de Dap y altura total, es el mayor de todos lo cual sugiere sobreestimación.

Ahora bien, la Figura 10 sugiere que la aplicación de la ecuación de regresión generada por Segura y Kanninen (2001) podría ser aplicada a la vegetación muestreada en este estudio, con igual o mejor precisión que la generada en este estudio. Lo contrario ocurriría si se aplicara la ecuación de regresión generada a partir de Dap y Ht de Brown *et al* (1989) pues presentaría una tendencia a la subestimación de los valores de biomasa aérea total.

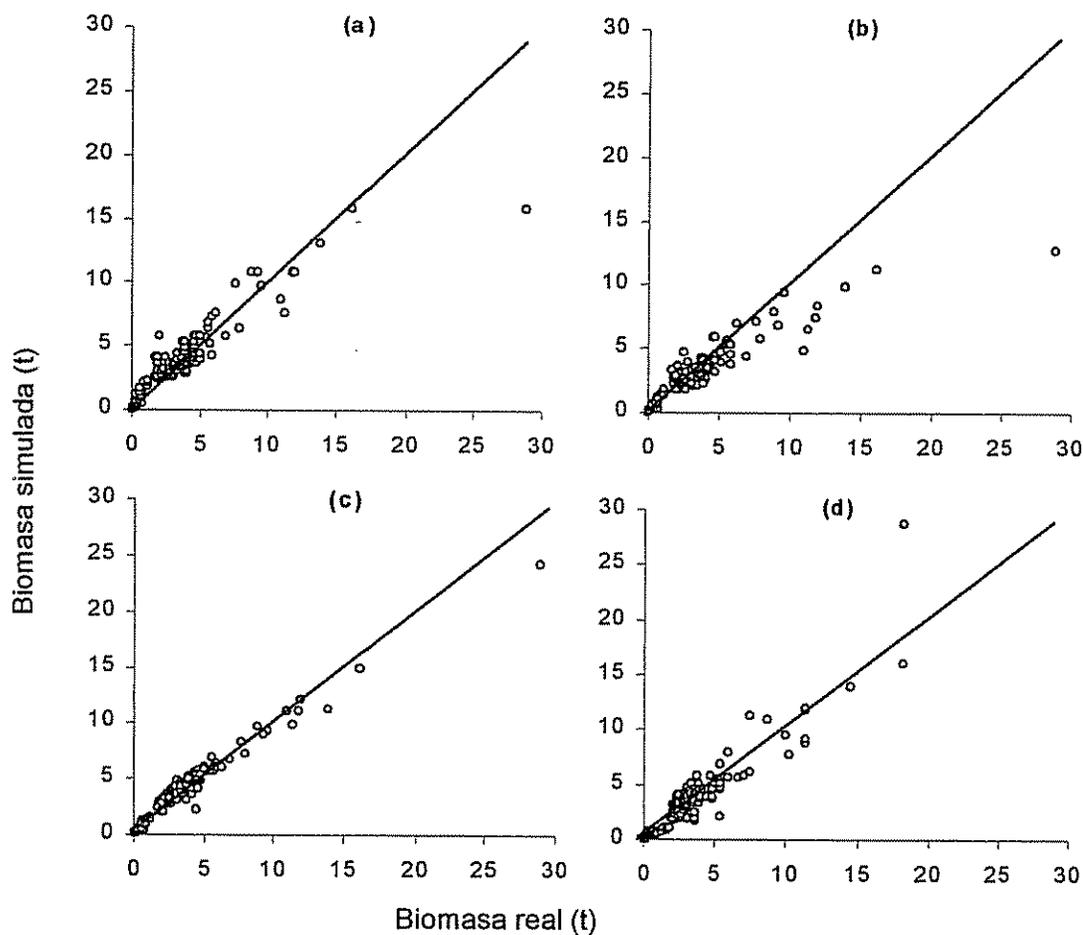


Figura 10. Simulaciones de biomasa real y estimada con modelos de (a) Brown *et al* (1989) que incluye Dap; (b) Brown *et al* (1989) que incluye Dap y altura; (c) Segura y Kanninen (2001); Ecuación 21 generada en esta investigación

#### 5.4.2 Biomasa aérea total y carbono en el bosque

Para lograr una mayor aproximación a los datos reales, las ecuaciones de regresión 27 y 33 fueron aplicadas a los datos observados en campo correspondientes al muestreo (inventario) de la vegetación. los valores proyectados por hectárea se presentan en el Cuadro 22.

**Cuadro 22. Resultados de biomasa aérea total por categoría de vegetación en la unidad de manejo "Río Chanchich"**

Categoría de Vegetación	Biomasa (t)			% del total
	Total muestreo (*)	AE (ha)	t / ha	
Brinzales	0.0154	0.014	1.07	1
Latizales bajos	0.179	0.045	3.98	2
Latizales altos	1.673	0.18	9.29	4
Fustales	87.778	0.45	195.06	93
<b>TOTAL</b>	<b>89.646</b>		<b>209.40</b>	<b>100</b>

(\*) Muestreo con 964 individuos de todas las categorías de vegetación con n = 18 parcelas.  
 AE: Area efectiva (Figura 1).

En términos de contenidos de carbono se tiene un total de 104.80 t/ha (D.E = 47.91; CV = 46%; LCI = 81 t C/ha; LCs = 129 t C/ha)<sup>12</sup>. Esto se distribuye de la siguiente manera: Brinzales 0.53 t C/ha; latizales bajos 1.99 t C/ha; latizales altos 4.65 t C/ha y fustales 97.53 t C/ha.

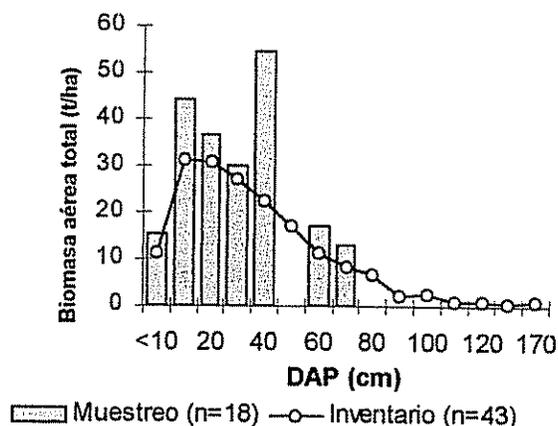
El valor reportado para fustales únicamente incluye tres individuos mayores a 50 cm dap. Aún así, se considera representativo de los fustales en general según los resultados de la comparación hecha entre la biomasa de fustales registrada en el muestreo (n = 18 parcelas) y la biomasa de individuos en el transecto (n = 17)<sup>13</sup>. No se encontraron diferencias estadísticas significativas (Pr>t 0.233) para este nivel de comparación. Los valores promedio de biomasa de los fustales en el muestreo y en el transecto fueron respectivamente, 120.69 t/ha (±98.60) y 99.05 t/ha (±51.16).

De igual forma, al aplicar la ecuación de regresión (Ec.21) a la base de datos del inventario forestal de la unidad de manejo (n = 43)<sup>14</sup> los resultados muestran una diferencia de 48.42 t/ha de biomasa.

<sup>12</sup> D.E: Desviación estándar; CV: Coeficiente de variación; LCI: Limite de confianza inferior (alfa 0.05); LCs: Limite de confianza superior (alfa 0.05).

<sup>13</sup> Los datos para la evaluación corresponden a individuos ≥ 20 cm dap reportados en el muestreo y en el transecto

<sup>14</sup> La base de datos del inventario únicamente registra datos de individuos ≥ 10 cm dap, sin embargo la biomasa de brinzales y latizales fue estimada aumentando 7% al total de biomasa, según lo observado en este estudio



**Figura 11. Biomasa aérea total (t/ha) para dos bases de datos**

Si bien es cierto que en la Figura 11 se muestra que el comportamiento de ambas curvas siguen un patrón aproximado, también puede notarse que la curva de los niveles de biomasa reportados en el muestreo sugiere una sobreestimación principalmente en las clases diamétricas inferiores.

Los mayores valores encontrados para el inventario forestal se reportan en la clase diamétrica de 10-20 cm y a partir de ahí, empieza a declinar según incrementa el Dap en los individuos. En total, la biomasa para la vegetación arbórea aérea de todas las clases diamétricas en el inventario fue de 162.27 t/ha.

Las estimaciones hechas hasta el momento contienen información para un amplio rango de vegetación, inclusive de regeneración natural establecida (< 10 cm dap). Bajo este esquema, se considera que la regeneración natural (brinzales y latizales) representa el 7% del total de biomasa estimado en los bosques, lo cual contrasta con lo reportado por Jordan y Uhl citados por Fearnside (1992). Estos autores indican que en un sitio en San Carlos de Río Negro, Venezuela, el 12% de la biomasa total corresponde a la vegetación cuyo Dap es menor a 10 cm.

Similares resultados a los que se presentan hasta el momento, se reportan en estudios recientes. Brown y Lugo (1992) reportan un rango amplio de biomasa (50 - > 1200; promedio de 300) estimados a través de un sistema de muestreo sistemático de 40 unidades de muestreo de 0.025 ha cada una. Obviamente, el rango de esta estimación es muy amplio como para hacer inferencias para escalas mayores en superficie de bosques.

Lo mismo sucede con el rango reportado en el presente estudio. Aquí, se tiene un promedio de 210.69 t/ha de biomasa (n = 18 parcelas; 0.025 ha) y un rango de 55 - 513 t/ha. Sin embargo, se justifica la validez de los datos ya que representan una aproximación real.

Existe una cantidad relativamente elevada de estudios que reportan rangos de estimación de biomasa dependiendo de la metodología seguida (métodos directos o indirectos) y criterios de muestreo principalmente. En el Cuadro 23 se muestra un resumen de estos estudios.

**Cuadro 23. Biomasa total estimada (t/ha) reportada por varios autores en el trópico americano**

SITIO DE ESTUDIO	METODOLOGIA	BIOMASA (t/ha)	FUENTE
3 sitios en Manaus y Armapa, Amazonas en Brasil	1- 1.3 ha de inventario (1960) (>25cm dap)	309 – 563	Brown y Lugo (1992)
Bosques en Amazonía, Brasil	Medición directa en 30 ha	112 – 376	Brown y Iverson (1992)
Bosques densos en Amazonas, Brasil	Mediciones destructivas y ecuaciones de regresión	144 – 513	Brown y Lugo (1982)
Bosques tropicales húmedos en Venezuela y Brasil	Ecuaciones de regresión a parcelas de muestreo	320 – 402 <sup>(b)</sup>	Brown <i>et al</i> (1981)
6 sitios en la cuencia del Amazonas en Brasil	445 – 4340 ha de inventario (1962) (>25cm dap)	175 – 397	Brown y Lugo (1992)
Proyecto RadamBrasil	Base de datos inventario (1970) (> 30 cm dap)	166 – 332	Brown y Lugo (1992)
Proyecto RadamBrasil	Base de datos inventario (1970) (> 30 cm dap)	173 – 226	Fearnside (1992)
Trópico en América <sup>(a)</sup>	Base de datos inventarios (> 10 cm dap)	180 – 260	Brown y Iverson (1992)
Bosques tropicales en Malasia	Análisis GIS/Base de datos inventario (> 10 cm dap)	288	Brown y Iverson (1992)
Bosques tropicales de Costa Rica bajo tratamiento silvícola	Ecuaciones de regresión y bases de datos de PPM	243 - 292	Segura (1999)
Unidad de manejo "Uaxactún", Petén, Guatemala	Mediciones destructivas y ecuaciones de regresión	78	Aguilar (2002)

<sup>(a)</sup> Estudios hechos en Brasil, Bolivia, Guyana, Ecuador, Guatemala, Nicaragua, Panamá, Perú, Surinam y Venezuela.

<sup>(b)</sup> El rango varía dependiendo de las variables incluidas en las ecuaciones de regresión; 95% Intervalo de confianza.

Puede notarse la variación en las estimaciones y cómo el promedio reportado en el presente estudio se encuentra dentro de los rangos estimados para bosques tropicales indistintamente de la metodología seguida. Sin embargo, la variación de resultados sugiere cautela en las extrapolaciones.

Siguiendo las recomendaciones de algunos autores para evitar errores de estimación y poder extrapolar la información generada en este estudio con más precisión, debería utilizarse unidades de muestreo de mayor tamaño y un tamaño de muestra más grande; y procurar una distribución al azar de las parcelas en todo el bosque para obtener información más representativa (Brown y Lugo 1992, Fearnside 1992).

### 5.4.3 Estimación de biomasa y carbono en hojarasca y suelo

En la hojarasca de la unidad de manejo "Río Chanchich" se ha encontrado un total de 3.4 t/ha ( $n = 18$ ; D.E: 1.323; CV = 39%). El rango observado varía de 1.61 a 6.29 t/ha. Sin embargo, con alta confiabilidad estadística (alfa 0.05) el dato promedio podría situarse entre los límites de confianza 2.74 y 4.06 t/ha de hojarasca.

En términos de estimación de biomasa en hojarasca, el dato reportado se encuentra en el rango que otros autores han encontrado para el trópico. Por ejemplo, algunos estudios reportan rangos que van de 3.2 a 5.2 t/ha de biomasa de mantillo (Klinge y Rodríguez 1968, Goley *et al* 1971, Sampaio *et al* 1993, Aguilar 2002). También se reportan datos que sobrepasan las 10 t/ha de biomasa de hojarasca y son considerados altos por los mismos autores (Raich 1983, Fassbender 1993).

En general, la capa de hojarasca se compone en su mayoría por hojas en proceso de descomposición y también por un porcentaje considerable de tallos leñosos. La humedad en la capa del mantillo al momento del muestreo de la hojarasca promueve la mineralización y humificación de la materia orgánica contenida en la hojarasca, por lo tanto, se esperaba que los niveles de carbono (y otros nutrientes) en el suelo fueran altos.

De esa manera se encontró que en "Río Chanchich" para los primeros 30 cm del suelo, la cantidad de carbono orgánico en el suelo (COS) oscilaba entre 144 – 331 t/ha obteniéndose un valor promedio de 212.57 ( $\pm 53.06$  t/ha) (Figura 12). Siguiendo el comportamiento típico, se encontró una menor cantidad de COS en los próximos 30 cm de profundidad, obteniéndose 48.86 t/ha ( $\pm 29.2$ ) y un rango comprendido entre los 17-121 t C/ha.

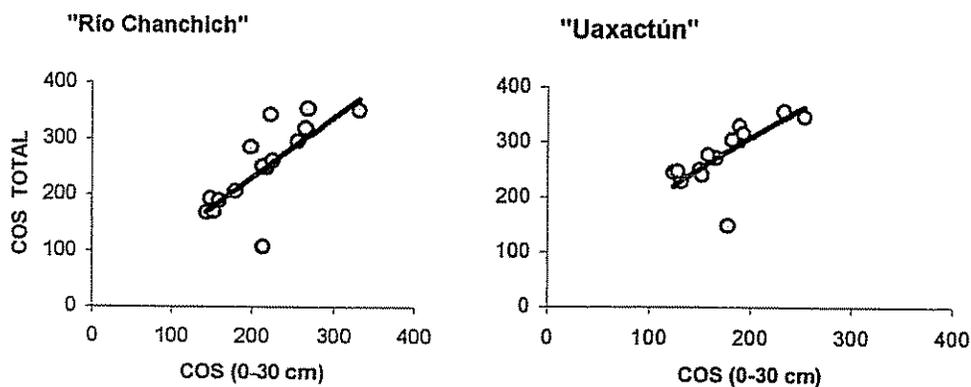


Figura 12. Relación entre el total de carbono orgánico del suelo y el carbono superficial en el bosque

Ahora bien, con fines de comparación entre un área de aprovechamiento recientemente intervenida y un área con un año de haberse intervenido, se presenta un análisis entre datos del contenido de carbono en el suelo en el POA 2002, Desertados de la U.M. "Río Chanchich" y el Poa 2001, "Tigre" de la U.M. "Uaxactún".

La unidad de manejo "Uaxactún" figura como la unidad de manejo con mayores contenidos de carbono en el suelo presentando un valor promedio de 296.57 t C/ha ( $\pm 55.92$ ). Río Chanchich por el contrario, presenta una variabilidad mayor y un menor contenido de carbono en el suelo ( $249.50 \pm 72.76$  t C/ha; n = 18) (Figura 12).

Estadísticamente no se reportan diferencias entre ambas unidades de manejo respecto a los totales de COS observados (gl = 28; Pr > t 0.0595); y por el contrario, sí se reportan diferencias estadísticas significativas entre valores promedio de COS superficial (gl = 28; Pr > t 0.0459).

Los resultados sugieren que el impacto del aprovechamiento de la masa arbórea aprovechable sobre el suelo hace que se aumente el contenido del carbono en el suelo, principalmente a nivel superficial; o bien que el impacto negativo no es tangible. Sin embargo, transcurrido un año de la intervención, la dinámica del carbono en el suelo podría no haberse definido con lo cual tal conclusión no puede sustentarse con precisión aceptable.

La Figura 12 muestra que la cantidad de carbono contenida en la superficie del suelo es de alrededor de 80% respecto al total en la unidad de manejo "Río Chanchich" y de alrededor de 65% en "Uaxactún". Esto pone de manifiesto que no es imprescindible el muestreo del suelo en niveles más profundos (30-60 cm) puesto que se podría derivar sus contenidos de carbono mediante las relaciones observadas, lo cual representaría una disminución significativa de los costos en investigaciones futuras.

##### **5.5 Análisis comparativo de las estimaciones de biomasa en áreas de aprovechamiento anterior**

En principio los bosques bajo estudio se enmarcan dentro de la categoría de bosque denso tropical primario aún cuando fueran perturbados en los últimos años por aprovechamientos selectivos y bajo diferentes intensidades de corta.

Aún implementándose una buena planificación en el aprovechamiento (tala dirigida, patios de acopio y vías de arrastre), irremediablemente estas prácticas han significado un impacto en el bosque en términos de reducción de la densidad de biomasa y carbono (t/ha) debido al aprovechamiento de los árboles comerciales; un impacto negativo sobre la vegetación remanente debido al claro causado por la tumba; y un impacto positivo por la misma apertura del claro al beneficiarse algunos grupos ecológicos.

Algunos autores reconocen dos grupos o gremios ecológicos: heliófitas y esciófitas (Barton 1984, Fetcher *et al* 1987, Chazdon 1987, Uhl *et al* 1988, Whitmore 1989); mientras que otros reconocen una subdivisión de estos grupos en heliófitas durables, heliófitas efímeras, esciófitas parciales y esciófitas totales (Finegan y Sabogal 1988, Finegan 1992).

A raíz de que se considera una diferencia importante entre los grupos ecológicos en términos de captación y almacenamiento de carbono a lo largo del tiempo, en el presente estudio se consideran tales grupos, pero en forma general (heliófitas y esciófitas).

Debe tomarse en cuenta que las limitaciones de información en cuanto a categorizar a algunas especies dentro de un grupo ecológico en especial, ha obligado a situarlas en un grupo ecológico desconocido hasta el momento. Sin embargo, este grupo se incluye en los resultados por considerarse que aporta una cantidad significativa de biomasa y carbono al total general.

En este sentido, el análisis de la información registrada en los caminos de arrastre y en sitios de tumba (claros) comprenderá tres grupos diferenciados según la tolerancia a la sombra de las especies (heliófitas, esciófitas y no identificadas) basados en la clasificación de Manzanero (1999).

#### 5.5.1 Análisis del contenido de carbono en áreas intervenidas

##### 5.5.1.1 Claros de tumba

La estimación de las dimensiones de los claros de tumba<sup>15</sup> observadas para las áreas de aprovechamiento bajo estudio se muestra en el Cuadro 24. No se reportaron diferencias estadísticas significativas ( $g_l = 108$ ;  $CV = 52\%$ ;  $CME = 62.56$ ;  $Pr > F 0.035$ ) entre áreas de aprovechamiento.

**Cuadro 24. Área de los claros de tumba para dos unidades de manejo forestal**

Unidad de manejo	POA	Año de intervención	Edad del claro (años)	CD (cm)	N	Área promedio (m <sup>2</sup> )	D.E.
"Río Chanchich"	Catrachas	1998	4	50-70	9	95.82	32.19
	Zorro	2001	1	50-80	21	87.03	44.50
	Desertados	2002	0	50-90	33	140.76	92.69
"Uaxactún"	Tanque	2000	2	60-90, 110	16	115.88	54.15
	Tigre	2001	1	50-100	18	117.57	43.98
	-sin nombre-	2002	0	50-80, 100	17	139.1	37.87

POA: Denominación del Plan Operativo Anual; CD: Clase diamétrica; N: Número de observaciones; D.E: Desviación estándar

<sup>15</sup> Considérese el dato reportado del área del claro (m<sup>2</sup>) únicamente como el área de la copa del individuo aprovechado

Es de suponerse que a través del tiempo, las unidades de manejo adquieran mayor experiencia en la tumba de individuos. Sin embargo, el tamaño de los claros no necesariamente tendría que disminuir en sus dimensiones pues existen otros aspectos muy relacionados como podría ser el caso de encontrarse un grupo de individuos tumbados que en forma colectiva hayan hecho mayor daño, comparado con el claro hecho por un solo individuo; o bien, que el paso de la maquinaria de arrastre haya causado impactos negativos al suelo.

En términos de regeneración de la vegetación, el POA "Tanque" presenta el valor más bajo de carbono en la biomasa ( $2.95 \text{ t C/ha} \pm 0.003$ ) y presentó diferencias estadísticas significativas ( $n = 420$ ;  $CME: 0.006$ ;  $Pr>F < 0.0001$ ) respecto al resto de áreas intervenidas (Cuadro 24 y Figura 13) excepto con el POA "Zorro".

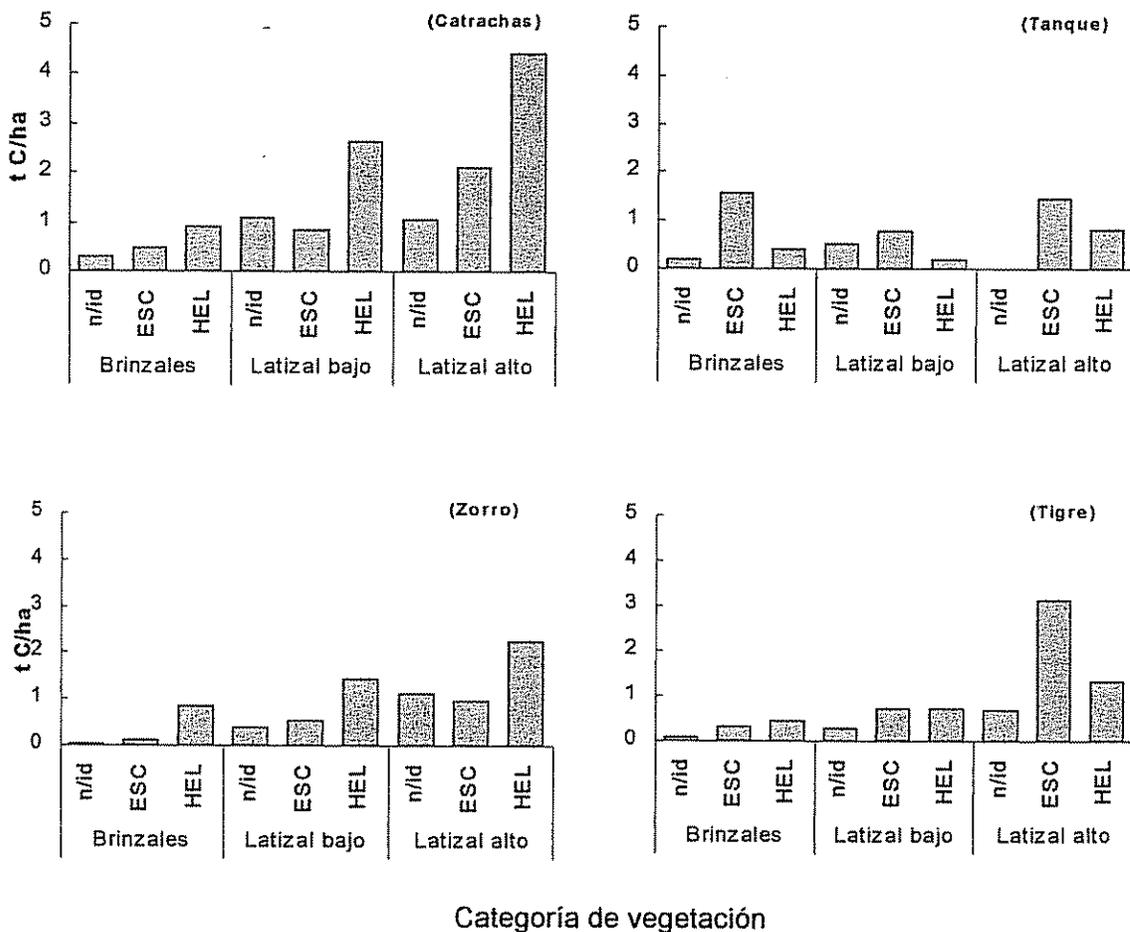


Figura 13. Distribución del carbono almacenado en la regeneración natural en claros de tumba de especies heliófitas (HEL), esciófitas (ESC) y "sin grupo definido (n/i)

A nivel de grupo ecológico, el contenido de carbono en especies heliófitas -HEL- es estadísticamente igual a aquél reportado para especies esciófitas -ESC- ( $Pr > F$  0.0197). El POA "Catrachas" presenta 6.90 t C/ha ( $\pm$  0.06) en la biomasa aérea total de especies heliófitas y no presenta diferencias estadísticamente significativas con las heliófitas de los POAs "Zorro" y "Tigre" ( $Pr > F$  0.0197). El carbono almacenado en especies heliófitas del POA "Tanque" presenta diferencias significativas con el resto de áreas de aprovechamiento, más no con el POA "Zorro" (Cuadro 25).

Las especies tolerantes a la sombra presentaron los mismos resultados estadísticos que las heliófitas respecto a los contenidos de carbono por área de aprovechamiento.

Era de esperarse que el área más antigua intervenida en "Uaxactún" presentara una mayor cantidad de biomasa en la regeneración tal como sucedió en "Río chanchich" con el POA "Tigre". Sin embargo, se cree que ésta última área presenta una mayor resiliencia. Además, no se pueden esperar diferencias tan marcadas dado el reducido tiempo de recuperación del área.

**Cuadro 25. Carbono almacenado (t/ha) en la vegetación y suelo de bosques intervenidos**

POA	Edad años	N	Claros de tumba						Caminos de arrastre							
			Vegetación				N	Hojarasca	Suelo	N	Vegetación				Hojarasca	Suelo
			n/i	HEL	ESC	Total					n/i	HEL	ESC	Total		
Catrachas	4	9	1.22	3.97	1.71	6.9	18	0.25	285.8	9	0.28	2.43	2	4.71	0.25	***
Zorro	1	21	0.78	2.29	0.81	3.88	10	0.58	359.3	7	0.65	0.81	0.52	1.98	0.56	***
Desertados	0	33	-*	-*	-*	-*	-**	-**	250.7	-**	-**	-**	-**	-**	0.38	***
Tanque	2	16	0.35	0.71	1.89	2.95	6	0.52	302.5	10	0.29	0.51	0.96	1.76	0.51	137.2
Tigre	1	18	0.52	1.24	2.08	3.84	6	0.57	258.0	7	0.37	0.72	0.79	1.88	0.55	107.8
sin nombre	0	17	-*	-*	-*	-*	7	0.32	188.0	-*	-*	-*	-*	-*	0.31	***

POA: Denominación del Poa; N: Número de observaciones; HEL: Heliófitas; ESC: Esciófitas

\* Se asume que no existe vegetación por efecto del aprovechamiento

\*\* Muestreo hecho simultáneamente a la tumba de los individuos

\*\*\* No se realizó muestreo

En lo referente a la hojarasca, se reportan mayores contenidos de carbono en las áreas intervenidas en el 2001: "Tigre" con 0.57 t C/ha ( $\pm$ 0.327) y "Zorro" con 0.58 t C/ha ( $\pm$ 0.257) (Cuadro 25). Sin embargo, el contenido de carbono en todas las áreas intervenidas no difiere estadísticamente ( $gl = 51$ ; CME: 0.43;  $Pr > F$  0.0001).

Las cantidades de biomasa y carbono en hojarasca se espera que sean poco variables, independientemente del año de intervención. Tal comportamiento se presentó, puesto que la cantidad de hojarasca en el suelo luego del aprovechamiento no depende del individuo que se tumbó, sino de los individuos remanentes que igualmente seguirán aportando biomasa a la capa de mantillo.

A nivel del suelo, el mayor contenido de carbono observado fue en el "Zorro" con 359.34 t C/ha ( $\pm 75.83$ ) y el menor en el área de aprovechamiento 2002 de "Uaxactún" con 187.97 t C/ha ( $\pm 65.64$ ) (Cuadro 25). Ambas áreas reportaron diferencias estadísticamente significativas respecto al resto de POAs (CV = 35%; CME = 93.95; Pr > F 0.031).

La peculiaridad presentada en estos resultados se observa en el hecho de haberse encontrado mayor cantidad de carbono en el suelo para el año 2001 ("Zorro") y 2000 ("Tanque") respecto a la cantidad encontrada para el año 2002 en ambas unidades de manejo. Esto podría considerarse como un indicio de que el efecto del aprovechamiento sobre el contenido del carbono en el suelo no fue significativo; o bien, que los niveles de carbono originales están en proceso de estabilización.

#### **5.5.1.2 Caminos de arrastre**

Al igual que para el caso analizado anteriormente, en las áreas habilitadas para el arrastre se encontraron niveles de contenido de carbono relacionados con la antigüedad del aprovechamiento. De esta forma, en la unidad de manejo "Río Chanchich" se tiene un mayor almacenamiento de carbono en la biomasa aérea total de las "Catrachas" (4.71 t C/ha) y un menor contenido en el "Zorro" con 1.98 t C/ha (Cuadro 25 y Figura 14).

Para la unidad de manejo "Uaxactún", sucede en forma contraria pues la cantidad de carbono almacenado en el área aprovechada más recientemente, es mayor que aquella reportada en el área aprovechada más antigua.

Ambas unidades de manejo reportan similares resultados en términos de almacenamiento de carbono en la biomasa aérea y puede ser debido a la diferencia de intensidades de corta entre áreas de aprovechamiento forestal y su consecuente impacto negativo sobre la vegetación remanente.

A nivel de área de aprovechamiento, el carbono almacenado en la biomasa aérea es estadísticamente igual en todos los POAs (CME = 0.0047; Pr > F 0.0929).

Aunque tampoco se reportan diferencias estadísticamente significativas en el contenido de carbono en especies heliófitas y esciófitas (Pr > F 0.1372), éstas últimas contienen más carbono almacenado en la biomasa de las áreas intervenidas de "Uaxactún" (Cuadro 25).

Basándose en esta información y contrastando con los resultados del área de claros para "Uaxactún", podría apuntarse que una mayor área disturbada por efectos de claros de tumba podría tener relación con una mayor propagación de especies esciófitas.

Asimismo, según resultados de claros de tumba y regeneración de especies heliófitas se podría pensar que independientemente de la cantidad de claros, una reducida superficie disturbada por claros de tumba generaría la regeneración de especies heliófitas y por tanto presentar la mejor opción para la recuperación del bosque respecto a los niveles de carbono iniciales.

Sin embargo, dada la limitación del estudio respecto a la edad de los disturbios, no se puede concluir sobre esta hipótesis en forma definitiva, sino hasta cubrir una mayor recuperación del bosque. El mismo argumento puede apuntarse para el caso del suelo y la hojarasca.

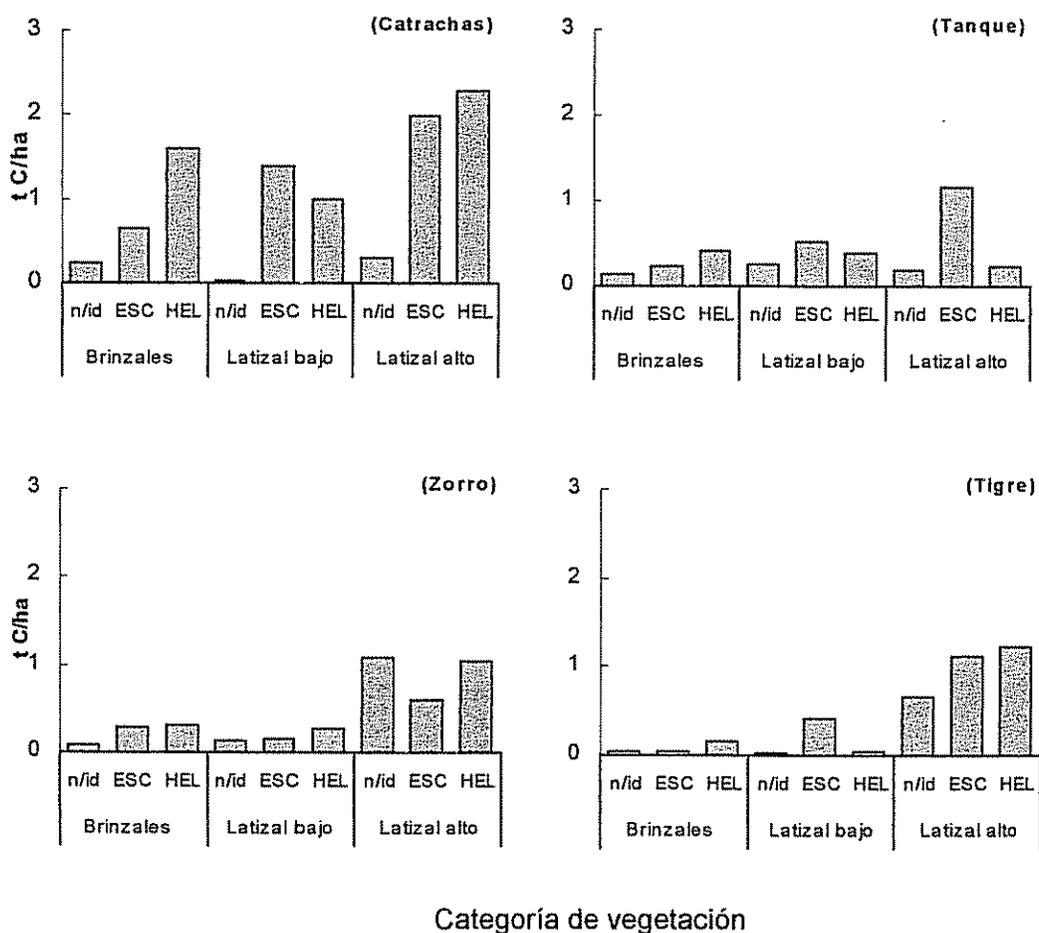


Figura 14. Distribución del carbono almacenado en la regeneración natural de caminos de arrastre de especies heliófitas (HEL), esciófitas (ESC) y "sin grupo definido (n/i)

## 5.6 Reseumen general de los contenidos de carbono en los bosques

A manera de síntesis general, se presentan las variables de biomasa aérea total y contenidos de carbono por componente de los bosques bajo estudio (Cuadro 26).

**Cuadro 26. Resumen general de la biomasa aérea total y carbono (t/ha) almacenado en las áreas bajo estudio**

Comp.	UM R Ch.		UM Uax. (*)		POA de antigua intervención															
					"Catrachas"				"Zorro"				"Tanque"				"Tigre"			
	Claros		Caminos		Claros		Caminos		Claros		Caminos		Claros		Caminos					
	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C	B	C		
Brinzales	1.07	0.54	0.3	0.15	1.65	0.82	2.45	1.22	1.03	0.52	0.69	0.34	2.14	1.07	0.77	0.38	0.85	0.42	0.24	0.12
Latizales bajos	3.98	1.99	-	-	4.56	2.28	2.39	1.20	2.38	1.19	0.54	0.27	1.47	0.73	1.17	0.58	1.7	0.85	0.5	0.25
Latizales altos	9.29	4.64	18.2	9.1	7.59	3.80	4.58	2.29	4.34	2.17	2.72	1.36	2.29	1.14	1.58	0.79	5.12	2.56	3.02	1.51
Fustales	195	97.5	82.9	41.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hojarasca	3.4	1.7	4.1	2.05	0.5	0.25	0.25	0.12	0.56	0.28	0.56	0.28	0.51	0.26	0.51	0.25	0.55	0.28	0.31	0.16
Suelo 0-30 cm	213	106	-	-	188	94.2	-	-	158	79	-	-	201	100	192	96	122	61	158	79
Suelo 30-60 cm	48.86	24.4	-	-	67.6	33.8	-	-	57	28.5	-	-	52.3	26.2	77.8	38.9	53.7	26.8	53	26.5
Total	474	237	105	53	270	135	9.67	4.83	223	112	4.51	2.26	259	130	274	137	184	92	216	108

(\*) Tomados de Aguilar (2002), quien no hizo distinción entre latizales

Comp: Componente del bosque; UM: Unidad de manejo (datos colectados previo al aprovechamiento); B: Biomasa aérea total (t/ha); C: Carbono almacenado (t/ha) Los valores fueron aproximados a conveniencia para efectos de presentación.

## 6. CONCLUSIONES

1. El promedio de gravedad específica en "Río Chanchich" es de 0.65 y en "Uaxactún" de 0.70. No se encontraron diferencias estadísticas significativas entre valores de tocón y rama. Con excepción de *Calophyllum brasiliense*, se observan diferencias respecto a especies.
2. El promedio de la fracción de carbono en la biomasa es de 0.50. No se reportan diferencias estadísticas significativas entre órgano muestreado ni entre especies.
3. El factor de expansión de biomasa promedio es de 1.60. Los brinzales presentaron diferencias estadísticamente significativas respecto al resto de categorías de vegetación.
4. Los modelos alométricos utilizados para la estimación de biomasa aérea total necesitan que la variable dependiente sea transformada mediante logaritmos. Como única variable independiente requieren el Dap sin desmerecer su precisión puesto que todos los parámetros y los modelos fueron altamente significativos ( $P < 0.0001$ ) y la variabilidad en los modelos es explicada en al menos 78%.
5. En "Río Chanchich" la biomasa aérea total es de 209.40 t/ha (104.7 t C/ha). Se distribuye en 7% para regeneración natural y 93% para fustales.
6. La biomasa de hojarasca en "Río Chanchich" es de 3.4 t/ha (1.7 t C/ha); el rango observado va de 1.61 a 6.29 t/ha de biomasa.
7. El suelo de "Río Chanchich" presenta contenidos de carbono que van de 144 a 331 t/ha con un promedio de 212.57 t/ha para los primeros 30 cm de profundidad. El segundo perfil presentó valores de 17 a 121 t C/ha con un promedio de 48.86 t C/ha.
8. Alrededor del 80% del total del carbono almacenado en el suelo corresponde al suelo superficial (0-30 cm) en "Río Chanchich"; y alrededor de 65% en "Uaxactún".
9. La unidad de manejo "Uaxactún" presentó áreas de claro de tumba mayores, en un rango de 115 a 139 m<sup>2</sup>; "Río Chanchich" presentó un rango de 87 a 140 m<sup>2</sup>.
10. La regeneración de la vegetación en claros de tumba fue menor en el POA "Tanque" (2.95 t C/ha) y presentó diferencias estadísticas significativas respecto al resto de áreas intervenidas.
11. Las especies heliófitas y esciófitas en claros de tumba y caminos de arrastre almacenan carbono en cantidades estadísticamente iguales.
12. Los niveles de contenido de carbono en hojarasca de bosques intervenidos no varían significativamente. Los mayores contenidos son reportados en "Uaxactún".

13. En los claros de tumba de "Río Chanchich" se registran mayores contenidos de carbono en el suelo en promedio para las áreas intervenidas comparado con los niveles reportados por las áreas de "Uaxactún".

## 7. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda elevar la precisión de las ecuaciones alométricas generadas aumentando el tamaño de la muestra de individuos fustales y la selección de un mayor número de árboles cuyas ramas no comerciales sean pesadas en campo.
2. Dada la facilidad de aplicación de las ecuaciones alométricas generadas en la presente investigación, se recomienda su uso para la estimación de la biomasa aérea total a partir de bases de datos de los bosques con características biofísicas similares y para los rangos diamétricos mencionados.
3. Continuar con las actividades de planificación según criterios de conservación del bosque principalmente en la tala dirigida, impidiendo claros de gran tamaño que pudieran generar el apareamiento de especies tolerantes a la sombra y evitar el establecimiento de especies no tolerantes a la sombra.
4. Implementar prácticas forestales tales como manejo dirigido de regeneración natural o bien reforestación en claros mayores, vías de arrastre y patios de acopio procurando aumentar la densidad de carbono y el área con cobertura arbórea de tal forma que se concuerden aspectos de aprovechamiento y conservación de los bosques en ambas áreas.
5. Se recomienda generar proyectos para el pago de servicios ambientales –PSA- en forma conjunta, basados en investigaciones como la presente para promover la conservación de las áreas boscosas del área y el desarrollo comunitario.
6. Continuar con la evaluación de la dinámica del carbono en la vegetación, hojarasca y suelo de áreas intervenidas, principalmente incluyendo la variable edad del disturbio.
7. Promover la investigación científica en cuanto a la dinámica del carbono atmosférico y el papel de los bosques tropicales propios de las concesiones forestales comunitarias. Además, es conveniente promover la investigación y los proyectos de PSA en las concesiones forestales coadministradas por las industrias forestales locales.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- Aguilar, S. 2002. Estimación de biomasa aérea y carbono almacenado en el área de aprovechamiento anual 2001, Uaxactún, Flores, Petén. Tesis Ing. For. Centro Universitario del Petén. Universidad de San Carlos de Guatemala. 61 p.
- Alatorre, G. 1997. El protocolo de Kyoto: un segundo primer paso en el camino hacia la protección del sistema climático planetario. Grupo de Estudios Ambientales. *In: Worldnet*. 1998. Día de la Tierra 1998: secuestro de carbono bajo los mecanismos de implementación conjunta y de fondo de desarrollo limpio. San José, CR. (en línea). Consultado 29-Oct-2001. Disponible en [www.laneta.apc.org/gea/kyotocli.htm](http://www.laneta.apc.org/gea/kyotocli.htm).
- Anderson, JM. 1992. Responses of soils to climate change. *Advances in ecological research* 22:163-210.
- Apps, MJ; Price, DT (eds.). s.f. Forest ecosystems, rest management and the global carbon cycle. Springer, Alberta, CA. NATO ASI Series I: Global environmental change, Vol, 40. 452 p.
- ASTM, 1983. Standard test methods for specific gravity of wood and wood-base materials. Edition D 143-83. Philadelphia, US. p. 35-76.
- Bámaca, EE. 2002. Dinámica del carbono en los residuos forestales producidos durante el aprovechamiento y el aserrío en la Reserva de Biosfera "Maya", Petén, Guatemala. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, CR. 75 p.
- Barton, AM. 1984. Neotropical pioneer and shade-tolerant tree species: do they partition treefall gaps?. *Tropical Ecology* 25(2):196-202.
- Beaumont R, E. 1999. El protocolo de Kyoto y el mecanismo para un desarrollo limpio: nuevas posibilidades para el sector forestal de America Latina y el Caribe. Santiago, CL. Departamento de Montes, FAO. 99 p.
- Black, CA; Evans, DD; White, JL; Ensminger, LE; Clark, FE; Dinauer, RC. (eds.). 1965. American Society of Agronomy, Madison, WI (EUA). Methods of soil analysis. p.2. Chemical and Microbiological Properties. Madison, WI (EUA).
- Brown, S; Lugo, AE. 1982. The storage and production of organic matter in tropical forests and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14(3):161-187.
- \_\_\_\_\_; Lugo, AE. 1984. Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science* 223:1290-1293
- \_\_\_\_\_; Gillespie, AJR; Lugo, AE. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4):881-902.
- \_\_\_\_\_; Iverson, LR. 1992. Biomass estimates for tropical forests. *World Resource Review* 4(3):366-383
- \_\_\_\_\_; Lugo, A. 1992. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17(1):8-18.
- \_\_\_\_\_; 1995. Management of forest for mitigation of greenhouse gas emissions. IPCC. 24. p. 776-797.
- \_\_\_\_\_; 1996. Papel actual y potencial de los bosques en el debate mundial sobre el cambio climático. *Unasylva* 17(185):2-10.
- \_\_\_\_\_; Sathaye, J; Cannell, M; Kauppi, PE. 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review* 75(1):80-91.
- \_\_\_\_\_; 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer. FAO, Forestry Paper 134. Roma, IT. 55 p.
- Cairns, MA; Meganck, RA. 1994. Carbon sequestration, biological diversity and sustainable development; integrated forest management. *Environmental management* 18(1):13-22

- Benitez, RF; Montesinos, JL. 1988. Catálogo de cien especies forestales de Honduras: distribución, propiedades y usos. Siguatepeque, HN, Escuela Nacional de Ciencias Forestales. 216 p.
- Carpio, IM. 1992. Maderas de Costa Rica: 110 especies forestales. San José, CR, Universidad de Costa Rica. 378 p.
- \_\_\_\_\_; Arroyo, O; Sánchez, E. 1996. Anatomía y ultraestructura de 20 especies maderables de importancia comercial en Costa Rica. Informe (INII-110-96) San José, Facultad de Ingeniería, Universidad de Costa Rica. 114 p.
- Catchpole, WR; Wheeler, CJ. 1992. Estimating plant biomass: a review of techniques. *Australian Journal of Ecology* 17:121-131.
- Chacín, F. 1998. Análisis de regresión y superficie de respuesta. Comisión de biblioteca, información, documentación y publicaciones. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay, VE. 274 p.
- Chazdon, R. 1987. Aspectos importantes para el estudio de los regímenes de luz en bosques tropicales. *Revista Biología Tropical* 35(supl. 1):191-196.
- Ciesla, WM. 1995. Climate change, forests and forest management: an overview. Forest resources division, FAO Forestry Paper, no, 126. 128 p.
- CONAP (Consejo Nacional de Areas Protegidas, GT). 1996. Plan maestro Reserva de Biosfera Maya. CATIE-CONAP. Turrialba, CR. Colección Manejo forestal en la Reserva de Biosfera Maya, no, 2. 40 p.
- Cornejo, F; Lombrado, I. 1993. Estimación de la producción de hojarasca en un bosque sucesional en el parque nacional Manu, Perú. *Revista forestal del Perú* 20(1):23-34.
- Diaz-Romeu, R; Balerdi, F; Fassbender, HW. 1970. Contenido de materia orgánica y nitrógeno en suelos de América central. *Turrialba* 20(2):185-192.
- Dixon, RK; Brown, S; Houghton, RA; Solomon, AM; Trexler, MC; Wisniewki, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190. Lugo, AE. 1990. Managing tropical forests in a time of climate change. *In: proceedings of southern regional technical work-planning conference of the National Cooperative Soil Survey, San Juan, PR. USDA, US. 25 p.*
- Echenique, R. 1970. Descripción, características y usos de 25 maderas tropicales mexicanas. México, DF. Series Maderas de México, MX, Cámara Nacional de la Industria de la Construcción. 237 p.
- Eduarte, E; Segura, MA. 1999. Determinación de carbono utilizando la calorimetría. Universidad Nacional, Heredia, CR. *Ciencias Ambientales* 15:54-55.
- FAO. 2001. Base de datos estadísticos (en línea). Consultado el 04/sept/2001. Disponible en: [http://www.fao.org/forestry/fo/fra/menu.jsp?lang\\_id=3](http://www.fao.org/forestry/fo/fra/menu.jsp?lang_id=3)
- Fassbender, HW. 1993. Modelos edafológicos de sistemas agroforestales. 2ª. ed. INFORAT. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Proyecto Agroforestal CATIE/GTZ, Serie de materiales de enseñanza, no, 29. 491 p.
- Fearnside, PM. 1992. Forest biomass in Brazilian Amazonia: comments on the estimate by Brown and Lugo. *Interciencia* 17(1):19-26.
- Ferreira, O. 1990. Manual de inventarios forestales. Escuela Nacional de Ciencias Forestales, Siguatepeque, Honduras. CENIFA (ed.) Serie miscelánea, no, 8. 99 p.
- Fetcher, N; Oberbauer, SF; Rojas, G; Strain BR. 1987. Efectos del régimen de luz sobre la fotosíntesis y el crecimiento en plántulas de árboles de un bosque lluvioso tropical de Costa Rica. *Revista Biología Tropical* 35(supl. 1):97-110.
- Finegan, B. 1992. Bases ecológicas para la silvicultura. *In V curso intensivo internacional de silvicultura y manejo de bosques naturales tropicales. Turrialba, Costa Rica, CATIE. s.p.*

- Finegan, B; Sabogal, C. 1988. El desarrollo de sistemas de producción sostenible en bosques tropicales húmedos de bajura: un estudio de caso en Costa Rica. *El Chasqui* 17:3-24.
- Furnival, GM. 1961. An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science* 4(7):337-341.
- Golley, FB. *et al.* 1971. La biomasa y la estructura mineral de ambos bosques de Darién, Panamá. *Turrialba* 21:186-196.
- González, E; Fisher, RF. 1998. Variation in selected wood properties of *Vochysia guatemalensis* from four sites in Costa Rica. *Forest Science* 44(2):185-191
- Herrera, Z; Morales, A. 1993. Propiedades y usos potenciales de 100 maderas nicaragüenses. Instituto Nacional de Recursos Naturales y del Ambiente/Cooperación Suecía al Sector Forestal. Managua, NI. 171 p.
- Hipkins, MF. 1984. Photosynthesis. *In: Wilkins, MB. (ed.) 1984. Plant physiology.* Pitman Publishing Limited, London, UK. p. 219- 248.
- Husch, B; Miller, C; Beers, T. 1963. Forest mensuration. Tercera edición. 397 p.
- IPCC. 2001. Climatic change 2001: the scientific basis (en línea). Consultado el 9-Nov-01. Disponible en <http://www.ipcc.ch/pub/tar/wg1/518.htm>.
- Izaurrealde, RC; Rosenberg, NJ; Lal, R. 2001. Mitigation of climatic change by soil carbon sequestration: issues of science, monitoring, and degraded lands. *Advances in agronomy* 70:1-75.
- Jenkinson, DS; Adams, DE; Wild, A. 1991. Model estimates of CO<sub>2</sub> emissions from soil in response to global warming. *Nature* 351:304-306
- Kanninen, M. 2000. Secuestro de carbono en los bosques: el papel de los bosques en el ciclo global del carbono. *In: Pomareda, C. Steinfeld (eds.) 2000. Intensificación de la ganadería en Centroamérica: beneficios económicos y ambientales.* CATIE-SIDE-FAO. 334 p.
- Klinge, H; Rodríguez, WA. 1968. Litter production in an area of the Amazon terra firme. *Amazoniana (Bra.)* 1:287-310.
- Laarman, JG; Sedjo, RA. 1992. Global forests: issues for six billion people. Duffy, AC; Morris, JM (eds.) McGraw-Hill. 337 p.
- Lal, R. 2002. The potencial of soils of the tropics to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Advances in Agronomy* 76:1-30
- Lemon, ER (ed.). 1983. CO<sub>2</sub> and plants: the response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide. AAAS Selected Symposium Series, no, 84. Westview Press, Inc, Colorado, US. 280 p.
- Locatelli, B. 1999. Bosques tropicales y ciclo del carbono. Trad. por Virginia Cruz y Oguer Reyes. Proyecto ambiental Nicaragua Finlandia, Ministerio del ambiente y los recursos naturales. Managua, NI. 49 p.
- \_\_\_\_\_; Leonard, S. 2001. Un método para medir el carbono almacenado en los bosques de Malleco, Chile. *Bois et forêts des tropiques* 267(1):69-81.
- López, JA; Litte, EJR; Ritz, GF; Rombold, JS; Hahn, WJ. 1987. Árboles comunes del Paraguay. Asunción, PY. Cuerpo de Paz. 425 p.
- Lugo, AE; Brown, S. 1993. Management of tropical soils as sinks or sources of atmospheric carbon. *Plant and Soil* 149:27-41.
- Malhi, Y; Grace, J. 2000. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *TREE* 15(8):332-337.

- Manzanero, MA. 1999. Evaluación de la estructura y composición florística de la sucesión secundaria en áreas disturbadas, bosque húmedo subtropical en la concesión forestal comunitaria de Carmelita, San Andrés, Petén. Tesis Ing. For, Centro Universitario del Nor-occidente, Universidad de San Carlos de Guatemala. 191P.
- Márquez, L (ed). 2000. CO<sub>2</sub> en uso del suelo: elementos técnicos para inventarios de carbono. Fundación Solar. Guatemala, GU. 31 p.
- Naburrs, GJ. 1996. Significance of wood products in forest sector carbon balances. *In*: Apps, MJ; Price, DT (eds.). s.f. Forest ecosystems, rest management and the global carbon cycle. Springer, Alberta, CA. NATO ASI Series I: Global environmental change, Vol, 40. 452 p.
- Nelson, BW; Mesquita, R; Pereira, JLG; Aquino, SG; Teixeira, G; Bovino, L. 1999. Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management* 117:149-167.
- Nelson, D; Sommer, L. 1975. A rapid and accurate method for estimating organic carbon in soil. *Proceedings of the Indiana Academy of Science*, 84, 456-462.
- NPV (Fundación Naturaleza para la Vida, GT.). 2002. Planes de manejo integrados elaborados por NPV. 1 disco compacto, 8 mm.
- Ortiz, E. 1997. Uso de factores de expansión para estimar biomasa arriba del suelo en árboles individuales en un bosque húmedo tropical. *In*: Congreso forestal centroamericano (3, 1997, San José, CR). 1997. Tercer congreso forestal centroamericano. Morales, E; Cartín, F. (eds). San José, CR. 297 p.
- Parry, M; Carter, T. 1998. Climate impact and adaptation assessment: a guide to the IPCC approach. United Kingdom, Earthscan Publications Limited. 166 p.
- Pickett, STA. 1983. Differential adaptation of tropical tree species to canopy gaps and its role in community dynamics. *Tropical Ecology* 24(1):68-84.
- Prodan, M; Peters, R; Cox, F; Real, P. 1997. Mensura forestal. IICA/GTZ. Serie Investigación y educación en desarrollo sostenible. San José, CR. 561 p.
- Raich, JW. 1983. Effects of forest conversión on the carbon budget of a tropical soil. *Biotropica* 15(3):177-184.
- Saldarriaga, JG; West, DC; Tharp, ML; Uhl, C. 1998. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *Journal of Ecology* 76:938-958.
- Sampaio, EV; Dallólio, A; Nunes, KS; Lemos, EP de. 1993. A model of litterfall, litter layer losses and mass transfer in a humid tropical forest at Pernambuco, Brazil. *Journal of Tropical Ecology* 9:291-301.
- Schneider, SH. 1989. The greenhouse effect: science and policy. *Science* 243:771-781
- SCIS/NPV (Sociedad Civil "Impulsores Suchitecos"/Fundación Naturaleza para la Vida, GT). 2000. Plan de manejo integrado de la unidad de manejo "Río Chanchich", Melchor de Mencos, Petén: primera revisión. Petén, GT. 133 p.
- Segura, MA. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis* en un bosque de altura de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis Licenciatura. Escuela Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar. Universidad Nacional, Heredia, CR. 147 p.
- \_\_\_\_\_. 1999. Valoración del servicio de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados en el área de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis. Mag. Sc. CATIE, Turrialba, CR. 118 p.

- Segura, MA; Venegas, G. 1999. Tablas de volumen comercial con corteza para encino, roble y otras especies del bosque pluvial montano de la cordillera de Talamanca, Costa Rica. CATIE. Turrialba, CR. Colección manejo diversificado de bosques naturales. Serie técnica Informe técnico, no, 306. 46 p.
- \_\_\_\_\_; Kanninen, M. 2001. Inventario para estimar carbono en ecosistemas tropicales. *In*: Orozco, L; Brumér, C. (eds.). 2002. Inventarios forestales para bosques latifoliados en América central. CATIE, CR. Serie Técnica Manual Técnico, no, 50. 264 p.
- Snowdon, P; Raison, J; Keith, H; Montagu, K; Bi, H; Ritson, P; Grieson, P; Adams, M; Burrows, W; Eamus, D. 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass. National carbon accounting system technical report, no, 31, primer borrador. Australian Greenhouse Office, AU. 114 p.
- Soliz, BG. 1998. Valoración económica del almacenamiento y fijación de carbono en un bosque subhúmedo estacional en Santa Cruz, Bolivia. CATIE, Turrialba, CR. Tesis Mag. Sc. 113 p + anexos.
- Steel, RGD; Torrie, JH. 1988. Bioestadística: principios y procedimientos. 2. ed. McGraw-Hill/Interamericana de México. México, DF. 622 p.
- Trexler, M, Haugen, C. 1995. Keeping it green; tropical forestry opportunities for mitigating climate change. World Resources Institute. Washington, D.C. US. 52 p.
- Uhl, C; Clark, K; Dezzio, N; Maquirino, P. 1988. Vegetation dynamics in amazonian treefall gaps. *Ecology* 69(3):751-763.
- UNEPET (Unidad de ejecución del Plan de Desarrollo Integral del Petén, GT). 1991. Plan de desarrollo integrado de Petén: diagnóstico general de Petén e inventario forestal. Santa Elena, Petén, GU. Vol, 1 y 4. p. 437 y 500.
- \_\_\_\_\_. 1992. Inventario forestal del Departamento de Petén, Guatemala, GT. 98 p.
- Whitmore, TC. 1989. Canopy gaps and the two major groups of forest trees. *Ecology* 70(3):536-538.
- WHRC, 1998. Carbon cycle. The Woods Hole Research Center (en línea). Consultado el 26-Oct-2001. Disponible en: <http://www.whrc.org/science/carbon/carbon.htm>.

## 9. ANEXOS

### Anexo 1. Especies reportadas en los muestreos de biomasa y regeneración natural y su grupo ecológico

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	AUTOR	FAMILIA	GRUPO ECOLOGICO
Abalo	<i>Syderoxylum sp.</i>	-	-	Esciófita
Aceituno	<i>Simarouba amara</i>	Aubl.	Simarubaceae	-
Aceituno peludo	<i>Hirtella americana</i>	Mill.	Rosaceae	Esciófita
Aguacatillo	<i>Licariasp</i>	-	Lauraceae	-
Amapola	<i>Pseudobombax ellipticum</i>	-	Bombacaceae	Heliófita
Amate	<i>Ficus spp.</i>	-	Moraceae	Esciófita
Anona de montaña	<i>Annona squamosa</i>	L.	Annonaceae	-
Baquelac	<i>Cesaria nitida</i>	(L.) Jacq.	Flacourtiaceae	Heliófita
Bojón blanco	<i>Cordia alliodora</i>	-	Boraginaceae	-
Canisté	<i>Pouteria campechiana</i>	(HBK) Baehmi	Sapotaceae	Esciófita
Canxán	<i>Terminalia amazonia</i>	(J.F. Gmel.) Exell	Combretaceae	Heliófita
Caoba	<i>Swietenia macrophylla</i>	King	Meliaceae	Heliófita
Carboncillo	<i>Cupania guatemalensis</i>	(Turcz.) Tadlk.	Sapindaceae	-
Catalox	<i>Swartzia lundellii</i>	Standl.	Caesalpiniaceae	Heliófita
Cedrillo hoja fina	<i>Guarea excelsa</i>	HBK.	Meliaceae	-
Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	-	Meliaceae	Heliófita
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i>	(L.) Gaerth.	Bombacaceae	Heliófita
Cojón de caballo	<i>Stemmadenia donnell-smithii</i> (Rose) Woodson		Apocynaceae	-
Copal	<i>Protium copal</i>	(Schl. & Cham.)	Burseraceae	Esciófita
Chacaj colorado	<i>Bursera simaruba</i>	(L.) Sarg.	Burseraceae	Heliófita
Chaltecoco	<i>Caesalpinia velutina</i>	(Britt. & Rose)	Caesalpiniaceae	Heliófita
Chechén blanco	<i>Metropium browneii</i>	-	-	Heliófita
Chicozapote	<i>Manilkara zapota</i>	(L.) Van Rayen	Sapotaceae	Esciófita
Chile chachalaca	<i>Allophylus kinlochii</i>	Standl.	Sapindaceae	Heliófita
Chilemalache	<i>Trichilia glabra</i>	L.	Meliaceae	Heliófita
Chilonché	<i>Eugenia capuli</i>	(Schl. & Cham.)	Myrtaceae	Heliófita
Chintoc blanco	<i>Wimmeria concolor</i>	Schl. & Cham.	Celastraceae	Esciófita
Chintoc negro	<i>Krugiodendron ferreum</i>	(Vahl) Urban.	Rhamnaceae	Esciófita
Chique	<i>Temstroemia tepezapote</i>	Schl. & Cham.	Theaceae	-
Chonté	<i>Cupania macrophylla</i>	A. Rich.	Sapindaceae	Heliófita
Danto	<i>Vatairea lundellii</i>	(Standl.) Killip. Ex	Papilionaceae	Heliófita
Gesmó	<i>Lysiloma sp.</i>	-	Mimosaceae	Heliófita
Guarumo	<i>Cecropia peltata</i>	-	-	Heliófita
Guayabillo	<i>Colubrina hetereneura</i>	(Griseb.) Standl.	Rhamnaceae	Esciófita

Nombre común	Nombre científico	Autor	Familia	Grupo ecológico
Hormigo	<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	Donn. Sm.	Papilionaceae	Heliófito
Izote de montaña	<i>Dracaena americana</i>	-	-	-
Jobillo	<i>Astronium graveolens</i>	Jacq.	Anacardiaceae	Esciófito
Jobo	<i>Spondias mombim</i>	L.	Anacardiaceae	Heliófito
Laurel blanco	<i>Ampelocera sp.</i>	-	Ulmaceae	Heliófito
Luín hembra	<i>Ampelocera hottlei</i>	Standl.	Ulmaceae	Esciófito
Malerio blanco	<i>Aspidosperma stegomeris</i>	(Woodson) Woodson	Apocynaceae	Esciófito
Malerio colorado	<i>Aspidosperma megalocarpon</i>	Muell. Arg.	Apocynaceae	Esciófito
Manax	<i>Pseudolmedia panamensis</i>	-	Moraceae	Heliófito
Manchiche	<i>Lonchocarpus castilloi</i>	Standl.	Papilionaceae	Heliófito
Mano de león	<i>Dendropanax arboreus</i>	(L.) Ocne & Planch.	Araleaceae	-
Matasano	<i>Casimiroa edulis</i>	Llave & Lex.	Rutaceae	-
Molinillo	<i>Quararibea fieldii</i>	Millsp.	Bombacaceae	-
Naranjillo	<i>Zanthoxylum elephantiasis</i>	Macfad.	Rutaceae	-
Palo de diente	<i>Trichilia glabra</i>	L.	Meliaceae	-
Palo de gas	<i>Amyris sylvatica</i>	Jacq.	Rutaceae	-
Palo de hueso	<i>Celtis trinervia</i>	Lam.	Ulmaceae	Esciófito
Papaturrito	<i>Coccoloba reflexiflora</i>	Standl.	Polygonaceae	-
Pasaque hembra	<i>Simarouba glauca</i>	D.C.	Simarubaceae	Heliófito
Pimienta	<i>Pimenta dioica</i>	-	Myrtaceae	Esciófito
Pimientio	<i>Rapanea guianensis</i>	Aubl.	Myrsinaceae	Esciófito
Piñón de montaña	<i>Jathropa curcas</i>	L.	Euphorbiaceae	-
Pucsiquil	<i>Faramea occidentalis</i>	(L.) A. Rich	Rubiaceae	-
Pucté	<i>Bucida buceras</i>	L.	Combretaceae	Heliófito
Quina	<i>Quiina schippii</i>	Standl.	Quiinaceae	Esciófito
Ramón blanco	<i>Brosimum alicastrum</i>	Sw.	Moraceae	Esciófito
Ramón colorado	<i>Trophis chorizantha</i>	Standl.	Moraceae	Heliófito
Ramon oreja de mico	<i>Brosimum costaricanum</i>	Liebm.	Moraceae	Esciófito
Roble	<i>Beureria oxyphylla</i>	Standl.	Boraginaceae	Heliófito
Sacuché	<i>Rehdera penninervia</i>	Standl. & Moldenke	Verbenaceae	Heliófito
Saltemuche	<i>Sickingia salvadorensis</i>	-	Rubiaceae	Esciófito
San Juan	<i>Vochysia hondurensis</i>	Sprague	Vochysiaceae	-
Santa María	<i>Calophyllum brasiliense</i>	(Camb.) Standl.	Guttiferae	-
Sasanté	<i>Xylopia frutescens</i>	Aubl.	Annonaceae	-

Nombre común	Nombre científico	Autor	Familia	Grupo Ecologico
Silión	<i>Pouteria amygdalina</i>	(Standl.) Baehmi.	Sapotaceae	Esciófita
Sosní	<i>Ocotea lundellii</i>	Standl.	Lauraceae	Heliófita
Subín colorado	<i>Acacia dolichostachya</i>	Blake	Mimosaceae	Heliófita
Tamahay	<i>Zuelania guidonia</i>	(Sw.) Britt. & Millsp.	Flacurticaceae	-
Tempisque	<i>Bumelia mayana</i>	Standl.	Sapotaceae	-
Testap	<i>Guettarda combsii</i>	-	Rubiaceae	-
Tres marías	<i>Forchammeria trifoliata</i>	Radlk.	Caparidaceae	-
Tzol	<i>Blomia prisca</i>	(Standl.) Aguilar	Sapindaceae	-
Violeta serrano	<i>Rinorea hummelii</i>	Sprague	Violaceae	-
Yaxnic	<i>Vitex gaumeri</i>	Greenm.	Verbenaceae	Heliófita
Yaxochoc	<i>Vitex sp.</i>	-	Verbenaceae	Esciófita
Yaya	<i>Malmea depressa</i>	(Baill.) Fries.	Annonaceae	Esciófita
Zacuayúm	<i>Matayba oppositifolia</i>	-	-	-
ZHF	<i>Pouteria reticulata</i>	(Engler) Eyma	Sapotaceae	-

**Anexo 2. Gravedad específica de especies comerciales en "Río Chanchich" y "Uaxactún"**

"Río Chanchich"					"Uaxactún"				
No.	Organo	Especie	DAP (cm)	G.E.	No.	Organo	Especie	DAP (cm)	G.E.
1	R	Caoba	62	0.68	1	R	Canxán	56	0.52
2	R	Caoba	66	0.67	2	R	Caoba	72	0.62
3	R	Caoba	67	0.75	3	R	Danto	70	0.69
4	R	Caoba	71	0.74	4	R	Gesmo	51	0.74
5	R	Caoba	72	0.69	5	R	San Juan	64	0.55
6	R	Caoba	100	0.65	6	R	Santa María	51	0.64
7	R	Cedro	62	0.53	7	R	Santa María	52	0.74
8	R	Manchiche	56	0.72	8	R	Santa María	53	0.66
9	R	Manchiche	57	0.78	9	R	Santa María	54	0.68
10	R	Manchiche	57	0.76	10	R	Santa María	55	0.52
11	R	Manchiche	59	0.78	11	R	Santa María	59	0.65
12	R	Manchiche	62	0.69	12	R	Santa María	66	0.67
13	R	Manchiche	66	0.76	13	R	Santa María	67	0.70
14	R	Santa María	56	0.66	14	T	Canxán	56	0.56
15	R	Santa María	60	0.70	15	T	Canxán	56	0.62
16	R	Santa María	74	0.66	16	T	Canxán	62	0.54
17	T	Caoba	60	0.76	17	T	Caoba	72	0.63
18	T	Caoba	60	0.67	18	T	Cedro	100	0.80
19	T	Caoba	60	0.67	19	T	Manchiche	52	0.60
20	T	Caoba	60	0.76	20	T	San Juan	64	0.48
21	T	Caoba	62	0.73	21	T	Santa María	51	0.67
22	T	Caoba	67	0.83	22	T	Santa María	54	0.67
23	T	Caoba	71	0.76	23	T	Santa María	54	0.67
24	T	Caoba	72	0.59	24	T	Santa María	55	0.54
25	T	Caoba	100	0.80	25	T	Santa María	66	0.78
26	T	Cedro	62	0.63	26	T	Santa María	72	0.66
27	T	Cedro	64	0.57	27	T	Santa María	75	0.77
28	T	Cedro	69	0.63					
29	T	Gesmo	67	0.72					
30	T	Manchiche	57	0.73					
31	T	Manchiche	59	0.88					
32	T	Manchiche	62	0.78					
33	T	Santa María	50	0.56					
34	T	Santa María	56	0.70					
35	T	Santa María	56	0.67					
36	T	Santa María	74	0.67					