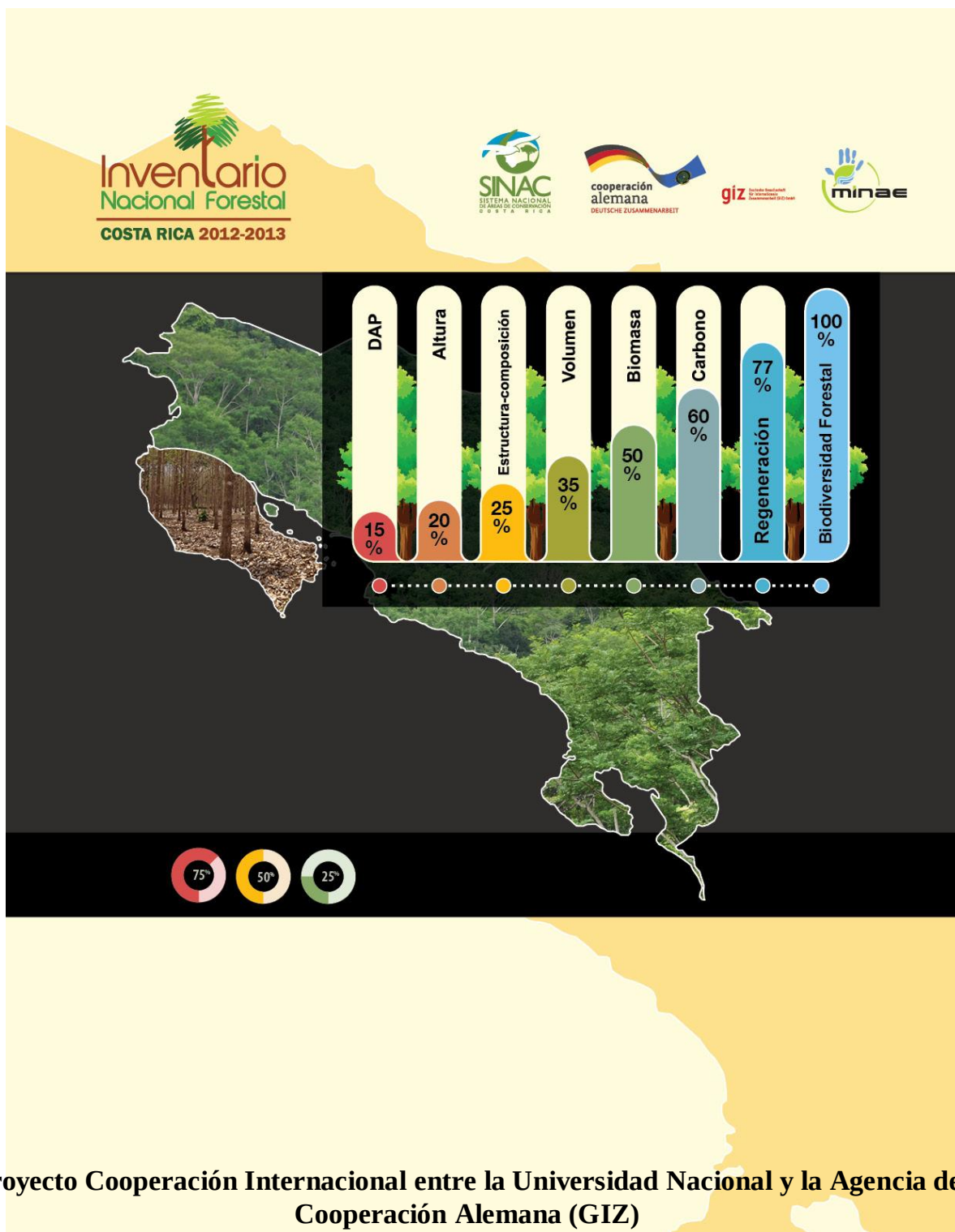




Construcción de Funciones Alométricas para Costa Rica en el Contexto del Proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de Centro América (Informe final)

Dr. William Fonseca G.

Costa Rica, julio 2016

Construcción de Funciones Alométricas para Costa Rica en el Contexto del Proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de Centro América (Informe final)

Responsable: Dr. William Fonseca González

Investigadores Asociados

M.Sc Federico Alice Guier
Lic. Marilyn Rojas Vargas
Lic. Ronny Villalobos Chacón
Bach. Junior Porras Quirós

Apoyo en el análisis estadístico: Dr. Manuel Spínola Parallada

Universidad Nacional
Escuela de Ciencias Ambientales
Programa Manejo de Carbono

**COSTA RICA
2016**



Índice general

Contenido	Pág.
1. Introducción -----	2
2. Objetivos -----	3
3. Metodología -----	4
3.1 Área de estudio -----	4
3.2 Diseño de muestreo -----	4
3.3 Muestreo de biomasa -----	4
3.4 Determinación de la biomasa seca -----	12
3.5 Determinación de la fracción de carbono -----	12
3.6 Determinación del carbono en el suelo -----	12
3.7 Ajuste de modelos alométricos -----	13
4. Resultados -----	14
4.1 Modelos de biomasa y carbono -----	14
4.2 Modelos de volumen -----	24
4.3 Porcentaje (fracción) de carbono en la biomasa -----	24
5. Costos totales y financiamiento -----	26
6. Problemas durante la ejecución -----	26
7. Análisis y valoración -----	27
7.1 Estructuras del organismo ejecutor del proyecto e identificación del grupo destinatario con el proyecto -----	27
7.2 Métodos y procedimientos de trabajo (valoración técnica) -----	28
7.3 Costos y beneficios -----	28
7.4 Repercusiones sobre el grupo de destinatario/región/país (en particular para las mujeres de la región del proyecto) -----	28
8. Conclusiones -----	29
9. Literatura citada -----	30

Índice de cuadros

Contenido	Pág.
Cuadro 1. Rango diamétrico y del área basal y número de especies por Zona usados para construir los modelos para estimar biomasa, carbono y volumen -----	13
Cuadro 2. Modelos para estimar biomasa y carbono para el fuste y el árbol completo en bosque de altura. Costa Rica, 2016 -----	15
Cuadro 3. Modelos para estimar biomasa vegetal y carbono en la biomasa vegetal para el ecosistema en bosque de altura. Costa Rica, 2016 -----	16
Cuadro 4. Modelos para estimar biomasa y carbono para el fuste y el árbol completo en bosque seco. Costa Rica, 2016-----	17
Cuadro 5. Modelos para estimar biomasa vegetal y carbono en la biomasa vegetal para el ecosistema en bosque seco. Costa Rica, 2016-----	18
Cuadro 6. Modelos para estimar biomasa y carbono para el fuste y el árbol completo en bosques del pacífico central. Costa Rica, 2016 -----	19
Cuadro 7. Modelos para estimar biomasa vegetal y carbono en la biomasa vegetal para el ecosistema en bosques del pacífico central. Costa Rica, 2016-----	21
Cuadro 8. Modelos para estimar biomasa y carbono para el fuste y el árbol completo en bosques de la zona norte. Costa Rica, 2016-----	22
Cuadro 9. Modelos para estimar biomasa vegetal y carbono en la biomasa vegetal para el ecosistema-----	23
Cuadro 10. Modelo para estimar volumen total para bosque de altura, bosque seco, bosques de pacífico central y zona norte. Costa Rica, 2016-----	24
Cuadro 11. Fracción de carbono por componente de biomasa y en el suelo----	26

Índice de figuras

Contenido	Pág.
Figura 1. Malla de muestreo aleatorio para las zonas de estudio. Costa Rica 2016 -----	5
Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo en bosque seco. Costa Rica 2016 -----	6
Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo en bosque de altura. Costa Rica 2016 -----	7
Figura 4. Ubicación de los sitios de muestreo en la zona norte. Costa Rica 2016 -----	8
Figura 5. Ubicación de los sitios de muestreo en el pacífico central. Costa Rica 2016 -----	9
Figura 6. Diseño de muestreo en campo para estimar biomasa y carbono, 2015-----	11
Figura 7. Representación de muestreo de biomasa en campo -----	11
Figura 8. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol en bosque de altura: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa del fuste, d) carbono del fuste -----	16
Figura 9. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosque de altura: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa en árboles, d) carbono en árboles -----	17
Figura 10. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol en bosque seco: a) biomasa total, a) carbono total, c) biomasa del fuste, d) carbono del fuste -----	18
Figura 11. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosque seco: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa en árboles, d) carbono en árboles -----	19
Figura 12. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol en bosques del pacífico central: a) biomasa total, a) carbono total, c) biomasa del fuste -----	20
Figura 13. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosques del pacífico central: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa en árboles, d) carbono en árboles -----	21
Figura 14. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol en bosques de la zona norte: a) biomasa total, a) carbono total, c) biomasa del fuste, d) carbono del fuste -----	22
Figura 15. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosques de la zona norte: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa en árboles, d) carbono en árboles -----	23
Figura 16. Modelos para estimar el volumen del fuste en: a) zona de altura, b) pacífico seco, c) pacífico central, d) zona norte -----	25

1. Introducción

Los bosques tienen la capacidad de almacenar el dióxido de carbono atmosférico en la biomasa, cumpliendo así una función muy importante en la regulación del cambio climático. El cambio climático es quizás el mayor problema que enfrenta la humanidad, razón suficiente para brindarle la atención requerida y asignar recursos para generar información que pueda evitar un desastre mayor.

Bajo este escenario se desarrolló el proyecto “Construcción de Funciones Alométricas para Costa Rica en el Contexto del Proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de Centro América.” El objetivo superior fue evaluar la capacidad de mitigación del cambio climático de los ecosistemas boscosos y desarrollar capacidades técnicas que le permitan al país mayor facilidad para incorporarse a los mercados de carbono, contribuyendo con la estrategia REDD+ de Costa Rica y a la Carbono Neutralidad. La información dasométrica se colectó a partir de la corta de árboles o de evaluaciones en pie y permitió la construcción de funciones alométricas para estimar la biomasa y el almacenamiento de carbono en bosques naturales (primarios y secundarios). Además, se generó información sobre la fracción de carbono por especie y por componente de biomasa, indispensables para la estimación de carbono en un ecosistema.

En este informe se presentan los modelos desarrollados para cuatro zonas del país: el bosque de altura, bosque seco, zona norte y pacífico central. Los modelos ajustados son para el volumen, la biomasa y el carbono para el árbol individual y para el fuste, para la biomasa y el carbono de la masa arbórea y la biomasa y carbono total por hectárea. Los modelos ensayados para el componente de hojas, ramas y raíz no ajustaron bien (R^2 inferior a 8) y los errores asociados al mismo superaron el 25%, por lo tanto se no se incluyen en este documento.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Evaluar la capacidad de mitigación del cambio climático de los ecosistemas boscosos y desarrollar capacidades técnicas que le permitan al país mayor facilidad para incorporarse a los mercados de carbono, contribuyendo al logro de la estrategia REDD+ y el mercado doméstico de carbono.

2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar modelos basados en relaciones alométricas para predecir la biomasa y/o el carbono por componente del árbol (hojas, ramas, tronco, raíz) y para el árbol completo y la biomasa y/o el carbono total (árboles, vegetación herbácea y necromasa) por unidad de superficie.
- Generar modelos para estimar el volumen del árbol para las especies de mayor Índice de Valor de Importancia (IVI).
- Obtener información sobre carbono en el suelo.

2.3 Valoración del logro del objetivo y de la contribución alemana (en particular, de la contribución a la solución del problema de fondo)

La participación en los mercados de carbono, sean estos regulados o voluntarios y más recientemente con REDD+, requiere de información pertinente y de la tecnología necesaria para evaluar los stock de carbono y para los procesos de monitoreo, reporte y verificación (MRV). El desarrollo de métricas sobre acumulación de carbono es fundamental en este proceso y por eso la necesidad de generar la información para proyectar de una manera confiable la capacidad de almacenamiento de carbono de los ecosistemas forestales naturales (bosque primario y secundario). También se requiere de asesoría especializada para desarrollar proyectos y es necesaria la construcción de capacidades institucionales para tener injerencia nacional.

El aporte financiero de la cooperación alemana fue fundamental para el logro de los objetivos propuestos, en concreto, se logró construir los modelos para cuatro zonas del país, con información adicional sobre volumen, fracción de carbono y porcentaje de materia seca

por componente de biomasa. Parte importante fue la capacitación de personal (7 personas a nivel profesional como participantes directos en la ejecución del proyecto), 15 estudiantes de la carrera de ingeniería forestal, y aproximadamente 100 personas capacitadas a nivel de cursos impartidos como parte de un programa de educación continua de la Escuela de Ciencias Ambientales.

3. Metodología

3.1 Área de estudio

El estudio abarca las siguientes zonas:

- provincia de Guanacaste y Puntarenas, estudiando el bosque seco y algunas transiciones vegetacionales.
- Área de Conservación Pacífico Central (ACOPAC), que abarca los cantones Aguirre, Parrita, Garabito, Esparza, Atenas, entre otros.
- Zona Norte, los cantones San Carlos, Los Chiles, Upala, Guatuso.
- Partes altas, principalmente los robledales.

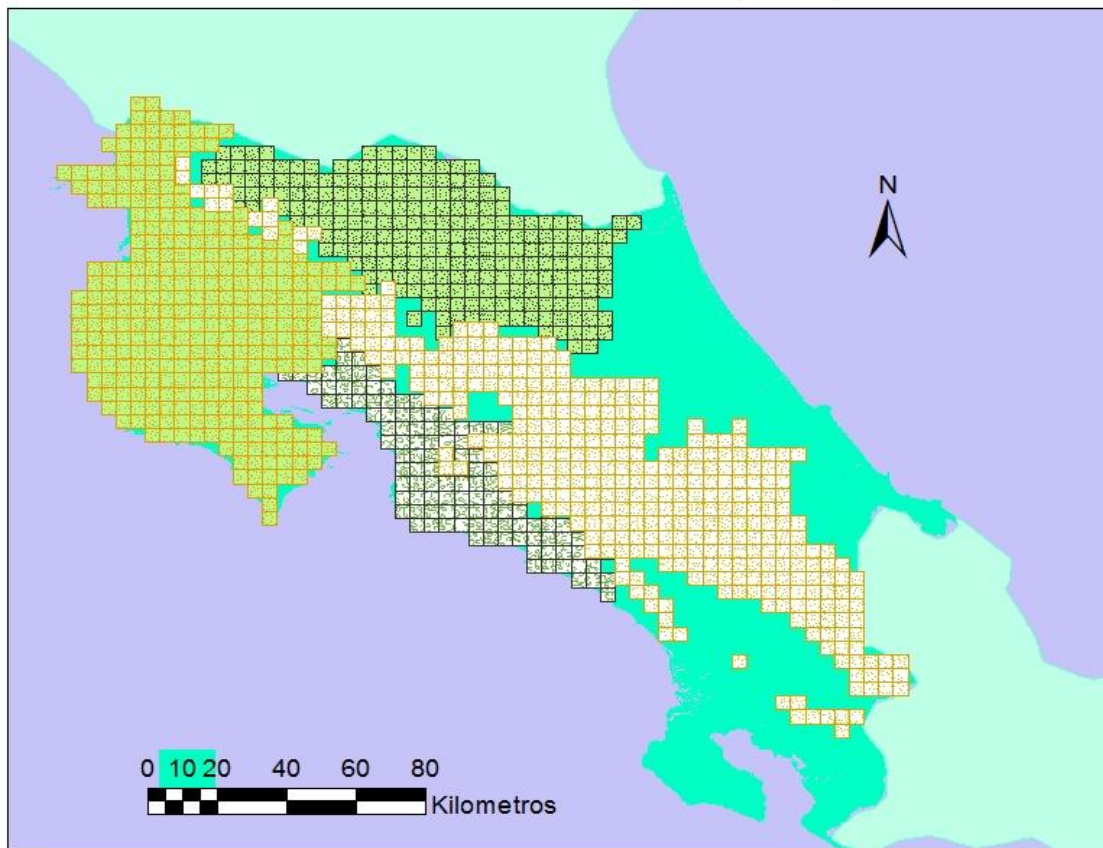
3.2 Diseño de muestreo

3.2.1 Selección de sitios de muestreo

El diseño de muestreo fue aleatorio sin remplazo, se cubrió cada zona con una malla imaginaria de cuadrículas de 36 km^2 ($6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$), lo que representa una población de “N” de 350 cuadrículas para bosque seco, 376 en bosque de altura, 275 en la zona norte y 225 para el pacífico central (**Figura 1**). El tamaño de muestra “n” fue fijada con base a una intensidad de muestreo del 4% por zona; esto representa 14 sitios en bosque seco, 15 para bosques de altura, 11 para la zona norte y 9 para el pacífico central (**Figura 2, 3, 4 y 5**).

En cada cuadrícula seleccionada se eligió una propiedad con cobertura boscosa de distintas edades con el fin de obtener variabilidad en densidad de biomasa. En cada propiedad se establecieron en promedio cinco unidades de muestreo de 500 m^2 . Para la ubicación de los sitios de muestreo dentro del bosque se recurrió a profesionales del sistema de áreas de conservación (SINAC) o al propietario de la finca.

Diseño aleatorio a traves de grillas por región



Simbología	
	Grilla para Bosque de Altura (1000-2999 msnm)
	Grilla para bosque seco
	Grilla para Pacifico Central
	Grilla para Zona Norte
	Nicaragua/ Panamá
	CR
	Oceano

UNA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA



Sistema de coordenadas: CRTM 05
Proyección: Transversal de Mercator
Datum: WGS84
Unidades: Kilometros
Fecha de creación: 29 de Marzo, 2016

Figura 1. Malla de muestreo aleatorio para las zonas de estudio. Costa Rica 2016.

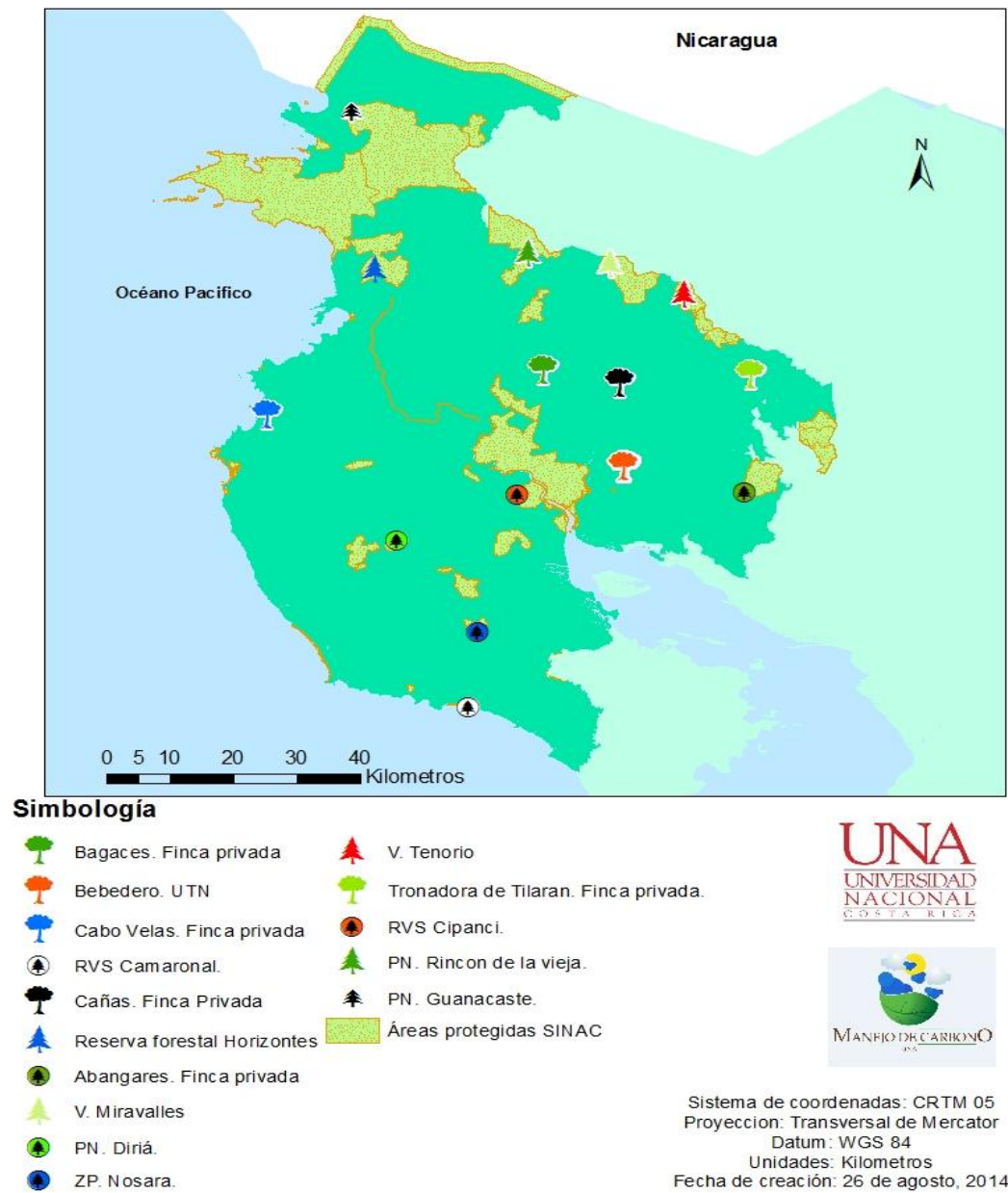
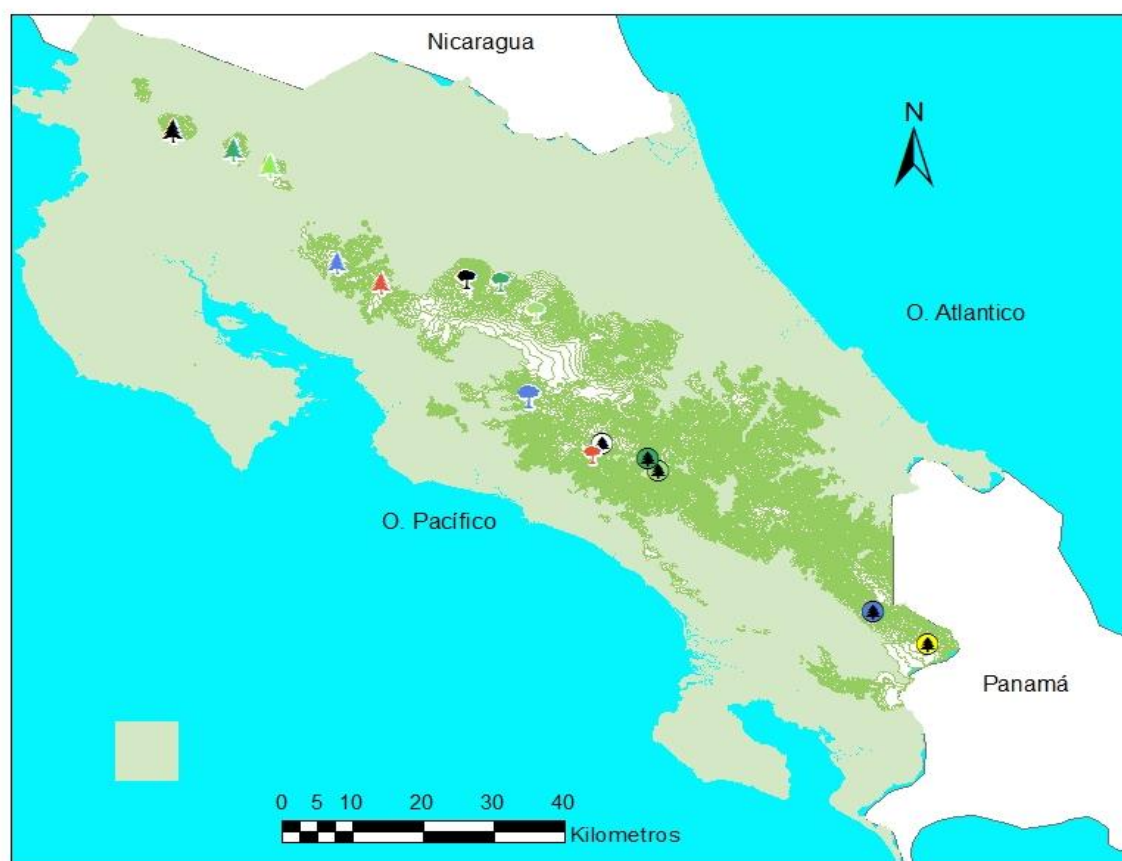


Figura 2. Ubicación de los sitios de muestreo en bosque seco. Costa Rica 2016.



Simbología

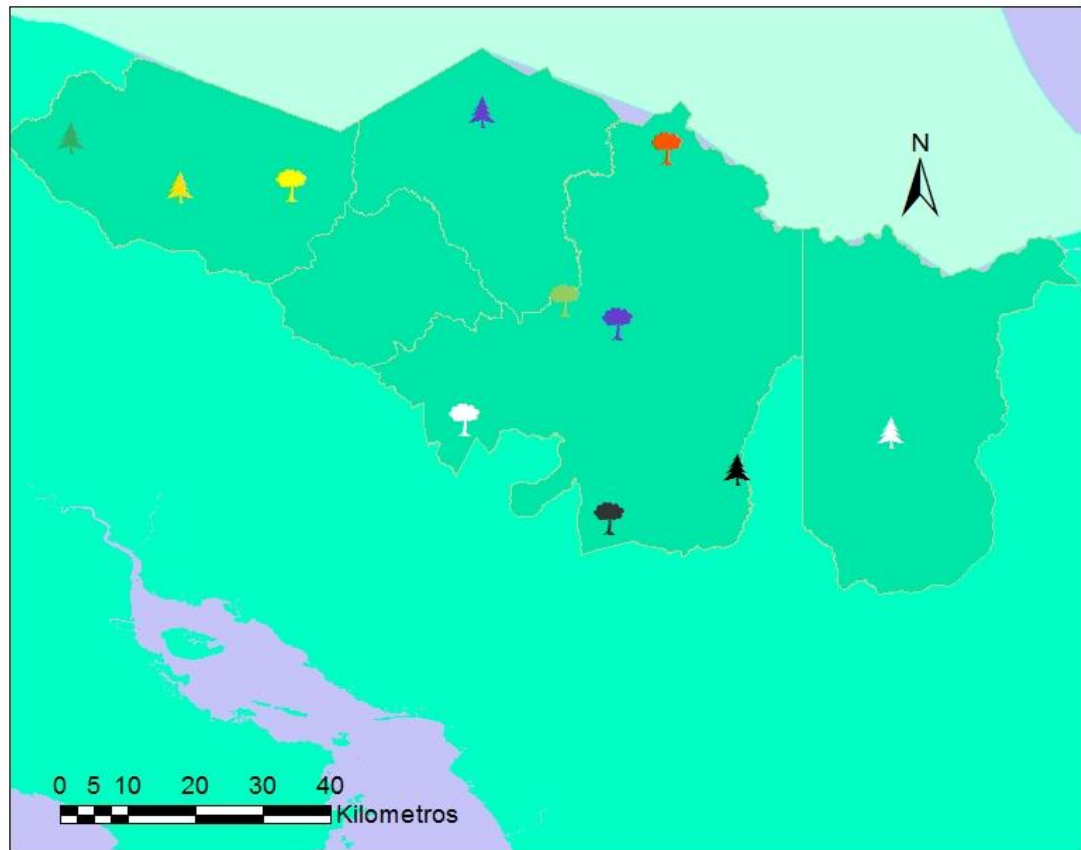
▲ Volcan Rincon de la Vieja	▲ ACCVC	▲ Altos de Cotton
▲ Volcan Miravalles	▲ ZP Cerros de Escazu	■ Cobertura boscosa de 1000-2999 msnm
▲ Volcan Tenorio	▲ RF Los Santos	
▲ Monte Verde	▲ Copey de Dota	
▲ Reserva Alberto Manuel Brenes	▲ Tapantí	
▲ PN Juan Castro Blanco	▲ Villa Mills	
▲ ZP Río Toro	▲ Potrero Grande	

Sistema de coordenadas: CRTM 05
 Proyección: Transversal de Mercator
 Datum: WGS 84
 Unidades: Kilometros
 Fecha de creación: 26 de Julio, 2014



Figura 3. Ubicación de los sitios de muestreo en bosque de altura. Costa Rica 2016.

Sitio de Zona Norte evaluados



Simbología

	San Carlos		Upala
	Cutris		Puerto Viejo
	La Fortuna		Río cuarto
	Florencia		Zona Norte
	Buena Vista		Nicaragua
	Boca San Carlos		CR
	Bimania de Upala		Oceano
	Los Chiles		

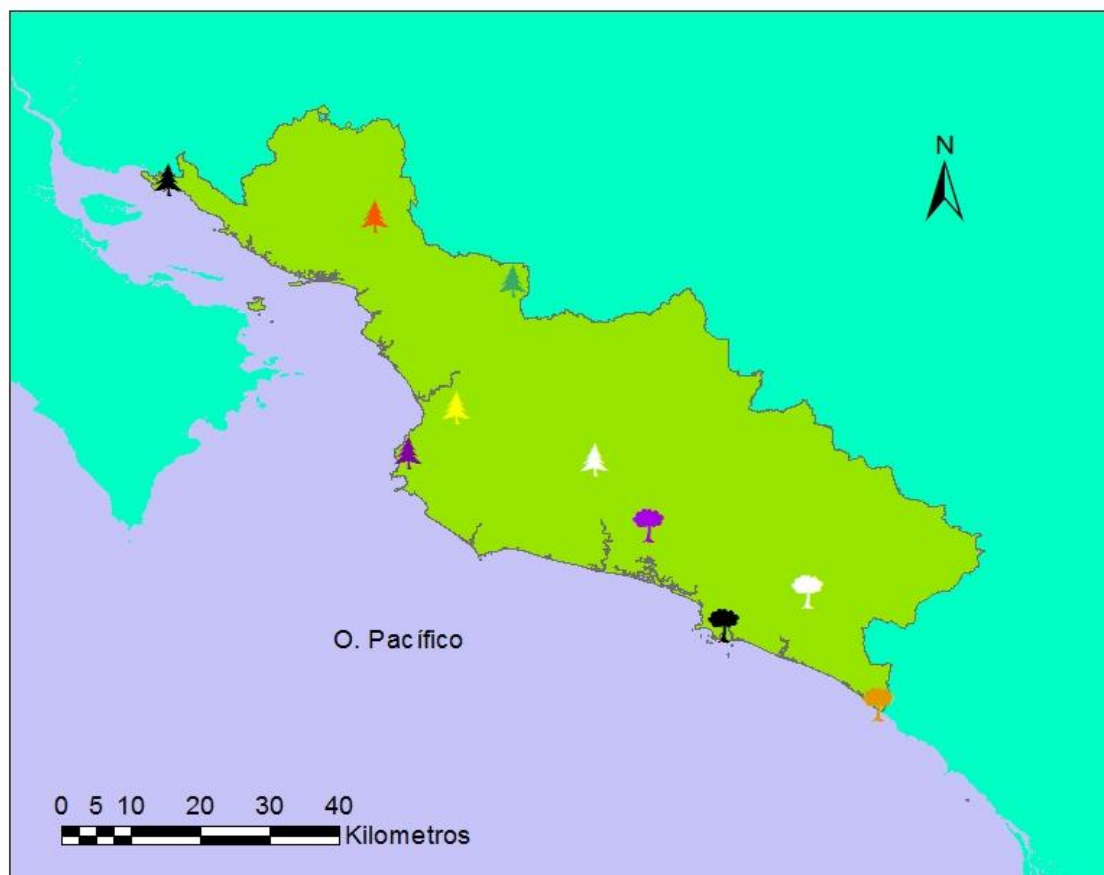
UNA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA



Sistema de coordenadas: CRTM 05
Proyección: Transversal de Mercator
Datum: WGS84
Unidades: Kilometros
Fecha de creación: 29 de febrero, 2016

Figura 4. Ubicación de los sitios de muestreo en la zona norte. Costa Rica 2016.

Sitio de Pacífico Central evaluados



Simbología

- | | | | |
|--|--------------------|--|-----------------|
| | CR | | RVS Punta Leona |
| | O. Pacífico | | Santa Juana |
| | PN Manuel Antonio | | PN La Cangreja |
| | Pocares de Parrita | | PN Carara |
| | Quebrara Honda | | Miramar |
| | RVS Barú | | ACOPAC |
| | RVS La Ensenada | | |

UNA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA



Sistema de coordenadas: CRTM 05
Proyección: Transversal de Mercator
Datum: WGS84
Unidades: Kilometros
Fecha de creación: 30 de abril, 2016

Figura 5. Ubicación de los sitios de muestreo en el pacífico central. Costa Rica 2016.

3.3 Muestreo de biomasa

La estimación de biomasa y el carbono almacenado siguió la metodología propuesta por MacDicken (1997) con algunas modificaciones.

3.3.1 Biomasa de los árboles

En la parcela de 500 m² se midió el diámetro normal a 1,3 m sobre el nivel del suelo (DAP) de los todos los árboles con DAP ≥ 10 cm y se identificó la especie y en un cuadrante o subparcela de 125 m² los árboles con DAP entre 2,5 cm y 9,9 cm (**Figura 6**). Se definieron cuatro clases diamétricas: menor a 10 cm, 10-19,9; 20-39,9 y mayor a 40 cm, con esto se determinó la especie de mayor Índice de Valor de Importancia (IVI) por clase dimétrica. El IVI es la suma de la abundancia, frecuencia y dominancia o área basal expresadas en valores relativos (Krebs 1985).

La biomasa de los árboles con mayor IVI se determinó haciendo uso del método destructivo, que consiste en derribar el árbol y pesar (kg) cada componente por separado (fuste -Fu-, ramas -Rm-, hojas -Ho- y raíz -Ra-). En árboles que por su tamaño representan un ingreso económico para el productor, es decir, su fuste puede procesarse y producir madera para diferentes usos, se determinó el volumen comercial con la fórmula de Smalian (MFR 2008). Todos los árboles cortados se cubicaron en el suelo cada dos metros para obtener el volumen total (**Figura 7, ecuación 1**). El volumen comercial se multiplicó por la densidad específica de la madera reportada en la literatura para estimar la materia seca. En los árboles de la clase dimétrica mayor a 40 cm se utilizó este mismo método para realizar el cálculo de biomasa, con la diferencia de que la cubicación se realiza en pie por medio de un dendrómetro.

$$\text{Volumen} = \pi/4 * (D_1^2 + D_2^2) / 2 * L$$

Ecuación 1

Dónde:

V = volumen de la troza o sección (m³)

D1 y D2 = diámetros al cuadrado de los extremos de la troza (cm)

L = Longitud de la troza (m)

La raíz se extrajo haciendo uso de una retroexcavadora y pulif (tipo tecla manual que funciona de forma horizontal), posteriormente se lavó para eliminar componentes como piedra y tierra. Se continuó con el proceso de pesado aproximadamente dos horas después de secadas al aire.

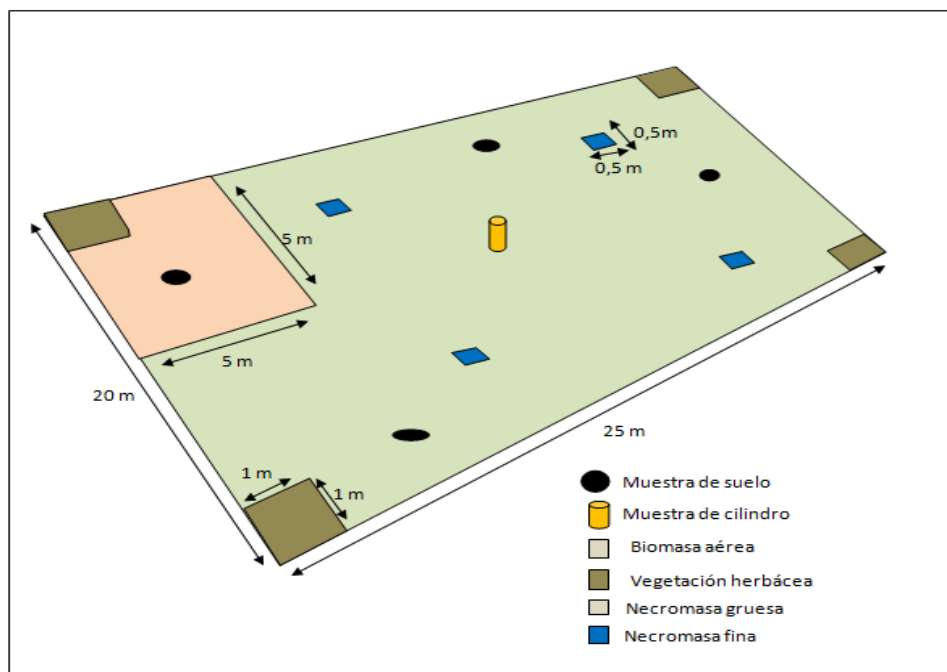


Figura 6. Diseño de muestreo en campo para estimar biomasa y carbono, 2015.

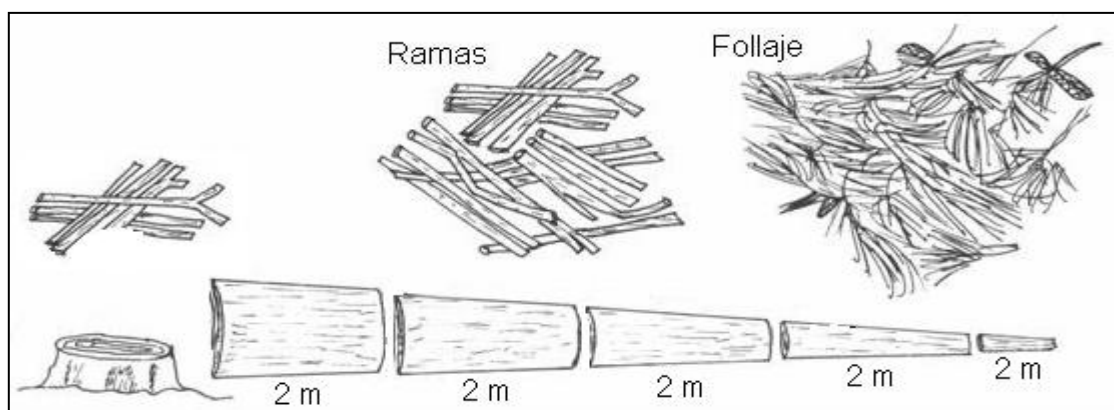


Figura 7. Representación de muestreo de biomasa en campo, adaptado de Díaz et al. (2007).

Vegetación herbácea y leñosa pequeña: La vegetación herbácea y leñosa pequeña consistió de en gramíneas, bejucos, helechos, plantas pequeñas y arbustos o regeneración de árboles con $DAP < 2,5$ cm. Este componente se cuantificó instalando una subparcela de 1×1 m en cada esquina de la parcela de 500 m^2 (**Figura 6**). Se colecta aproximadamente 1kg de

biomasa húmeda para determinar la materia seca y la de fracción de carbono en el laboratorio.

Necromasa: La necromasa fina (<2 cm de diámetro) y hojarasca se estimó en cuatro subparcelas de 0,5 x 0,5 m y la necromasa gruesa (≥2 cm de diámetro) en una parcela de 5 x 5 m, ambas ubicadas aleatoriamente en la parcela de 500 m² (**Figura 6**). Se colecta aproximadamente 1 kg de biomasa húmeda para determinar la materia seca y la fracción de carbono en el laboratorio.

Carbono en el suelo: Se tomó una muestra de suelo de los primeros 30 cm de profundidad en cada una de las esquinas de la parcela principal. Las submuestras se mezclaron para tomar una muestra compuesta de 500 g para determinar la fracción de carbono en el laboratorio. Adicionalmente, se colectó una muestra de suelo de forma aleatoria dentro de la parcela principal mediante el uso de un cilindro de un volumen conocido para determinar la densidad aparente (**Figura 6**).

3.4 Determinación de la biomasa seca

De cada componente de biomasa húmeda se extrajo una muestra de aproximadamente 1 kg que fue empacada en bolsas plásticas debidamente identificadas y se llevaron al laboratorio para determinar su peso húmedo (kg). La materia seca se calculó después de secarlas en un horno a 60 °C durante 72 horas y luego pesadas a temperatura ambiente (Fonseca et al. 2009). El porcentaje de biomasa seca se calculó utilizando la **ecuación 2**.

$$\% \text{ Biomasa seca} = (\text{peso seco} / \text{peso verde}) * 100$$

Ecuación 2

3.5 Determinación de la fracción de carbono

La muestra seca de cada componente de biomasa se tritura a 10 micras para determinar la materia orgánica (MO). El análisis de la materia orgánica se realizó haciendo uso de la metodología de Walkey y Black (Álvarez y Marín 2011).

3.6 Determinación del carbono en el suelo

La cantidad total de carbono almacenado en el suelo se cuantificó basándose en el contenido porcentual de carbono en el suelo, la densidad aparente y la profundidad de la muestra de suelo extraída (hasta 30 cm). Se extrajeron un total de cuatro muestras de suelo

ubicadas aleatoriamente en la parcela principal mediante una pala pequeña y se mezclaron para obtener una muestra compuesta de aproximadamente 1 kg de peso.

La densidad aparente se estimó mediante el método del cilindro (MacDicken 1997) utilizando la siguiente fórmula: $DA = P_{ss}/V_c$, donde DA es la densidad aparente (g/cm^3), P_{ss} es el peso seco del suelo (g) obtenido a temperatura constante de 105 °C durante 24 horas y V_c es el volumen del cilindro (cm^3). La cantidad de carbono almacenado por hectárea se obtuvo a partir de la **ecuación 3**.

$$CA = P_m * DA * \%COS$$

Ecuación 3

Dónde:

CA= carbono almacenado por hectárea (toneladas)

P_m = profundidad de suelo (cm)

DA= densidad aparente (g/cm^3)

$\%COS$ = contenido porcentual de carbono orgánico

3.7 Ajuste de modelos alométricos

Los modelos se ajustaron mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios con el programa estadístico Statgraphics Centurion XV. Se ensayaron aproximadamente 20 modelos para cada componente del árbol (hojas, ramas, fuste, raíz) y para el individuo total, así como para la biomasa y el carbono en el ecosistema (biomasa del árbol, biomasa de hierbas, necromasa, vegetación herbácea). El rango diamétrico, área basal y volumen para los modelos de biomasa y carbono, y modelo de volumen así como el número de especies varió por zona (**Cuadro 1**).

Cuadro 1. Rango diamétrico y del área basal y número de especies por zona usados para construir los modelos para estimar biomasa, carbono y volumen.

Zona	Rango diamétrico (cm)	Rango de área basal (m^2/ha)	N° especies: modelos de biomasa y carbono	N° especies: modelos de volumen
Bosque de altura	3,7-127,4	9,8-92,32	68	52
Bosque seco	4,1-80,0	5,0-52,5	43	35
Pacífico central	3,5-103,0	6,6-93,0	41	40
Zona norte	3,8-99,0	0,98-58,76	40	38

En la selección de la ecuación de mejor ajuste se tomó como guía el “Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: Del trabajo de campo a la predicción” de CIRAD y FAO (2012). Además se siguieron los siguientes pasos:

- Comprobación de los supuestos del análisis de regresión (normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas). Los modelos que no cumplen con algunos de estos supuestos son eliminados.
- Cálculo del coeficiente de determinación, en general llamado R^2 , mide la calidad del ajuste.
- Cálculo del criterio de información de Akaike (AIC), que mide la calidad relativa de un modelo estadístico, para un conjunto de datos.
- Cálculo del sesgo del modelo o error asociado al mismo. Aquellos modelos con un sesgo superior al 15% se desestimaron aunque fueran estadísticamente significativos.
- El modelo con menor puntaje en los criterios evaluados resulta seleccionado. Adicionalmente, se graficó los valores estimados contra los observados para determinar si los modelos sobreestiman o subestiman la variable respuesta. También utilizando el método gráfico se observa el comportamiento biológico de los modelos.

4. Resultados

4.1. Modelos de biomasa y carbono

A pesar de que parte de los compromisos bajo el convenio de financiamiento fue la elaboración de modelos para todos los componentes del árbol, los componentes de hojas, ramas y raíces, aunque mostraron ajustes (R^2) superiores a 0,7, no se presentan en este informe porque el error o sesgo asociado al modelo supera el 25%, razón que se consideró pertinente para descartarlos.

El fuste y el árbol completo (**Cuadros 2, 4, 6 y 8, Figuras 8, 10, 12 y 14**) si mostró un error aceptable. Para la biomasa total del árbol los valores de R^2 oscilan entre 89,1 y 97,4 y errores entre 5,5 y 11,8% para. En el carbono los valores de R^2 oscilan entre 88,4 y 97,4 y errores entre 5,4 y 11,7%. En el fuste el R^2 oscila entre 86,6 y 96,6 y errores entre 7,3 y 15,3% para la biomasa y para el carbono entre 86,3 y 92,8 y errores entre 11,0 y 20,3%.

Para los modelos de biomasa del árbol completo la Zona Norte presentó el ajuste más bajo ($R^2=89,1$, **Cuadro 8**) y Bosque seco el error más alto ($E=11,8\%$, **Cuadro 4**). En los

modelos de carbono el R^2 más bajo (88,4) se presentó para la Zona Norte (**Cuadro 8**) y el error más alto fue para la Bosque seco (E=11,7%, **Cuadro 4**).

En los modelos de biomasa para el fuste la Zona Norte presentó el ajuste más bajo ($R^2=86,6$, **Cuadro 8**) y Bosque seco el error más alto (E=15,3%, **Cuadro 4**). En los modelos de carbono el Bosque seco (**Cuadro 4**) presentó el R^2 (86,3) más bajo y el error más alto (E=20,6%).

Los modelos agregados para estimar biomasa y carbono por hectárea, en general presentan buenos ajustes (**Cuadros 3, 5, 7 y 9, Figuras 9, 11, 13 y 15**). Para la biomasa total (árboles+vegetación herbácea+necromasa) el R^2 supera la cifra de 88,4 (Zona Norte, **Cuadro 9**), con errores máximos de 11,6% (Zona Norte, Cuadro 8). La biomasa de los árboles mostró ajustes que superan el 86,6 (Zona Norte, **Cuadro 9**), con errores máximos de 14,0% (Zona Norte, **Cuadro 9**). Para las otras zonas de estudio el error de los modelos tanto en biomasa como para carbono varió entre -1,36 y 1,38% (**Cuadros 3, 5 y 7**).

Cuadro 2. Modelos para estimar biomasa y carbono para el fuste y el árbol completo en bosque de altura. Costa Rica, 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
Btotal= $\exp(-2,64093 + 2,62265 \cdot \ln(Dap))$	94,49	0,482	0,368	1,78086 (P=0,0925)	146	10,9	6,89
Ctotal= $\exp(-3,41222 + 2,61148 \cdot \ln(Dap))$	94,46	0,482	0,365	1,78187 (P=0,0927)	147	11,4	6,04
Bfuste= $\exp(-3,01425 + 2,50889 \cdot \ln(Dap \text{ cm}))$	92,85	0,531	0,405	1,82186 (P=0,1400)	147	14,5	5,93
Cfuste= $\exp(-3,78922 + 2,50603 \cdot \ln(Dap))$	92,84	0,530	0,405	1,82029 (P=0,1379)	147	14,7	4,68

Btotal: biomasa del árbol completo en kg, Ctotal: carbono del árbol completo en kg, Bfuste: biomasa del fuste en kg, Cfuste: carbono del fuste kg, Dap: diámetro normal a 1,30 m sobre el nivel del suelo en cm, ln: logaritmo natural. R^2 : coeficiente de determinación, EEE: error estandar de los estimados, EMA: error medio absoluto, DW: estadístico Durbin Watson, n: tamaño de la muestra, E%: error del modelo o sesgo, AIC: criterio de información de Akaike.

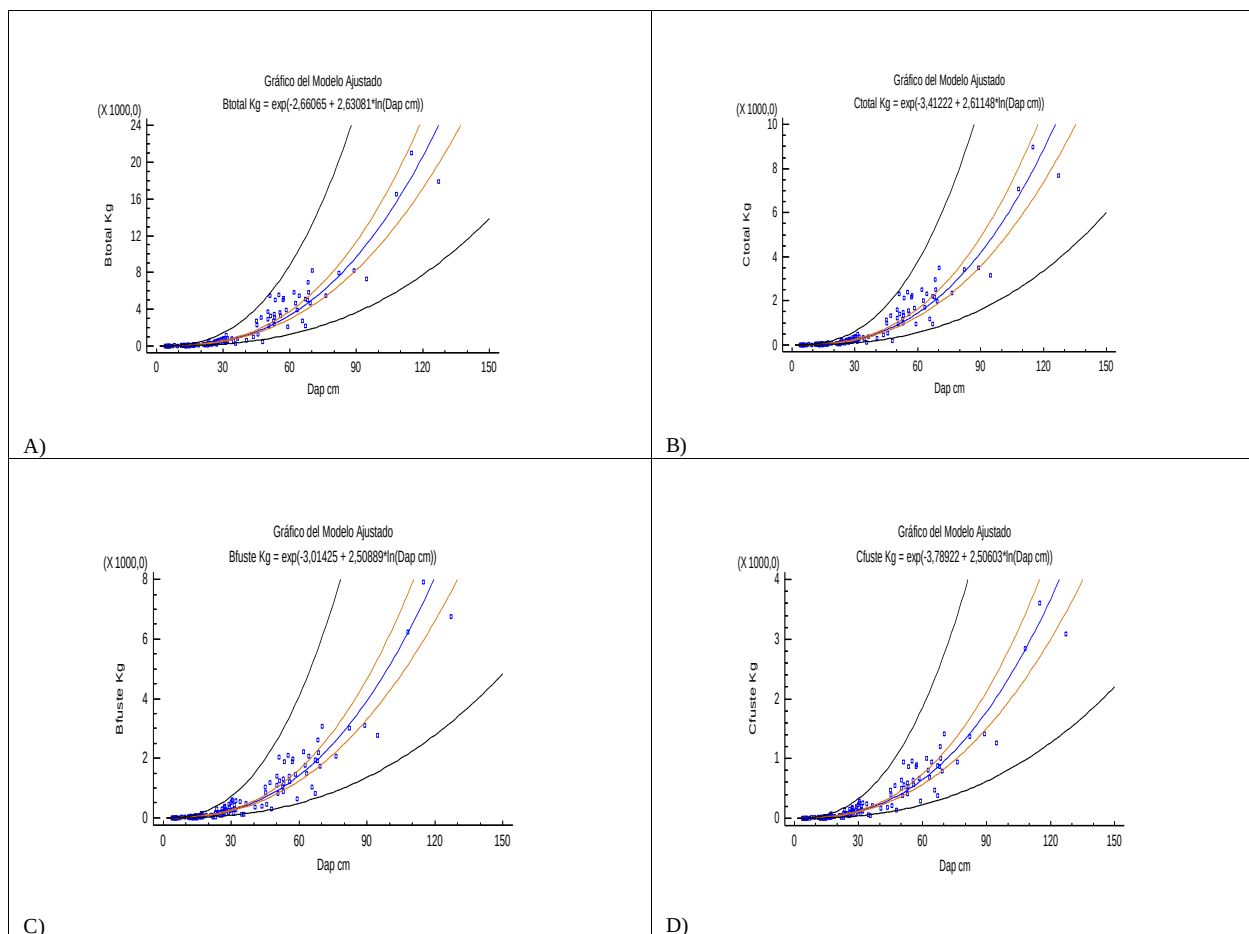


Figura 8. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol en bosque de altura: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa del fuste, d) carbono del fuste.

Cuadro 3. Modelos para estimar biomasa vegetal y carbono en la biomasa vegetal para el ecosistema en bosque de altura. Costa Rica, 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
Beco = $\text{Exp}((2,99209 + 0,167386 \cdot \ln(G))^2)$	90,72	0,024	0,0182	1,80281 ($P=0,1956$)	55	1,38	11,3
Ceco = $\text{Exp}(7,84155 + 1,17866 \cdot \ln(G))$	92,59	0,153	0,117	1,98557 ($P=0,4336$)	54	0,38	10,4
Barborea = $\text{Exp}(8,27074 + 1,27178 \cdot \ln(G))$	92,65	0,163	0,119	1,99747 ($P=0,4507$)	55	0,88	11,2
Carboreo = $\text{Exp}(7,5126 + 1,2522 \cdot \ln(G))$	93,12	0,155	0,114	1,99657 ($P=0,4494$)	55	0,04	11,8

Beco: biomasa vegetal total (árboles, vegetación herbácea y necromasa) en kg/ha, Ceco: carbono en la biomasa vegetal total (árboles, vegetación herbácea y necromasa) en kg/ha, Barborea: biomasa de los árboles kg/ha, Carboreo: carbono en la biomasa arbórea en kg/ha, G: área basal en m^2/ha , ln: logaritmo natural.

R^2 , EEE, EMA, DW, n, E% y AIC definidos al pie del Cuadro 2.

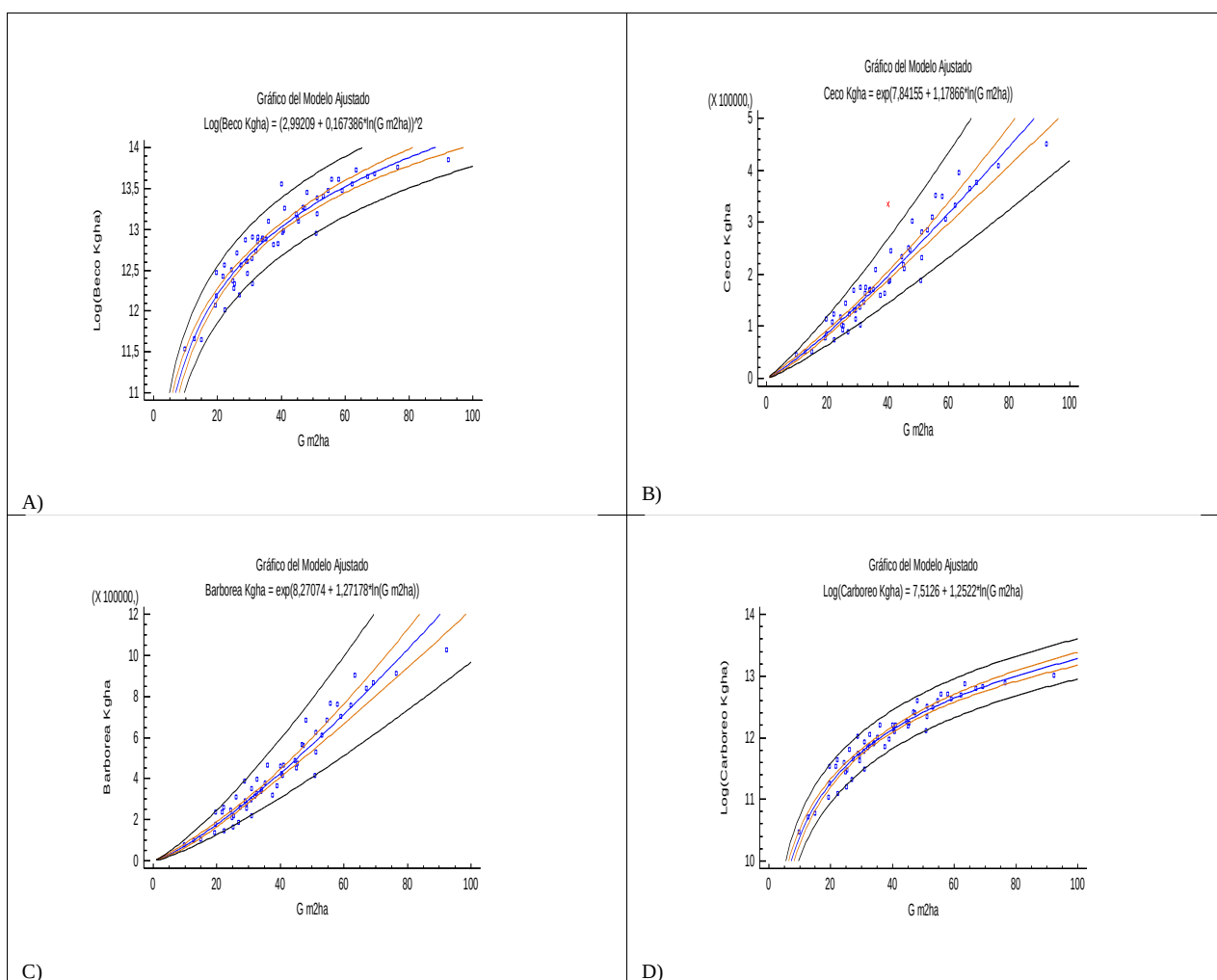


Figura 9. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosque de altura: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa en árboles, d) carbono en árboles.

Cuadro 4. Modelos para estimar biomasa y carbono para el fuste y el árbol completo en bosque seco. Costa Rica, 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
$B_{\text{total}} = \text{Exp}(-1,53009 + 2,17632 \cdot \ln(\text{Dap}))$	89,82	0,512	0,412	2,26072 ($P=0,9487$)	156	11,8	6,09
$C_{\text{total}} = \text{Exp}(-2,27186 + 2,17651 \cdot \ln(\text{Dap}))$	89,84	0,512	0,412	2,26209 ($P=0,9496$)	156	11,7	5,35
$B_{\text{fuste}} = \text{Exp}(\text{Exp}(1,93002 - 8,7641/\text{Dap}))$	87,29	0,160	0,122	1,84687 ($P=0,1687$)	157	15,3	5,81
$C_{\text{fuste}} = \exp(-2,76241 + 2,10518 \cdot \ln(\text{Dap}))$	86,30	0,586	0,440	2,25951 ($P=0,9485$)	157	20,6	4,68

B_{total} , C_{total} , B_{fuste} , C_{fuste} , Dap , $\ln$, R^2 , EEE, EMA, DW, n, E% y AIC definidos al pie del Cuadro 2.

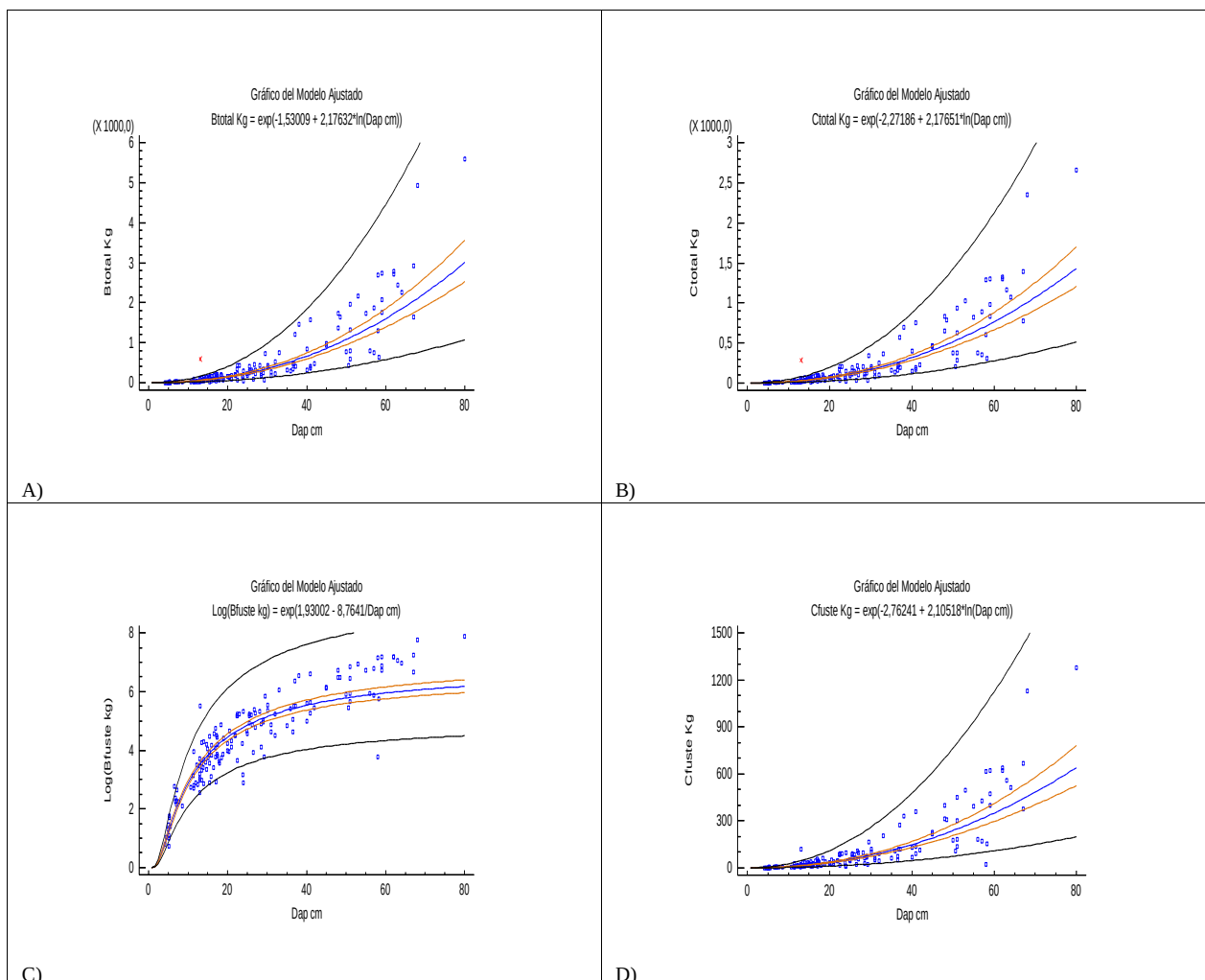


Figura 10. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol en bosque seco: a) biomasa total, a) carbono total, c) biomasa del fuste, d) carbono del fuste.

Cuadro 5. Modelos para estimar biomasa vegetal y carbono en la biomasa vegetal para el ecosistema en bosque seco. Costa Rica, 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
Beco = $(0,301575 + 2,46272*\sqrt{(G)})^2$	95,81	0,537	0,430	2,21472 ($P=0,8067$)	81	0,59	2,60
Log(Ceco) = $(1,2923 + 0,242744*\ln(G))^2$	96,30	0,022	0,018	2,348 ($P=0,9307$)	81	0,33	1,80
Barborea = $\exp(1,78492 + 0,99869*\ln(G))$	96,68	0,086	0,069	1,89706 ($P=0,2807$)	81	0,36	2,49
Carboreo = $\exp(1,04351 + 0,99867*\ln(G))$	96,70	0,086	0,069	1,8932 ($P=0,2748$)	81	0,37	1,75

Beco, Ceco, Barborea y Carboreo en Mg/ha, G y ln, definidos al pie del Cuadro 3. R^2 , EEE, EMA, DW, n, E% y AIC definidos al pie del Cuadro 2.

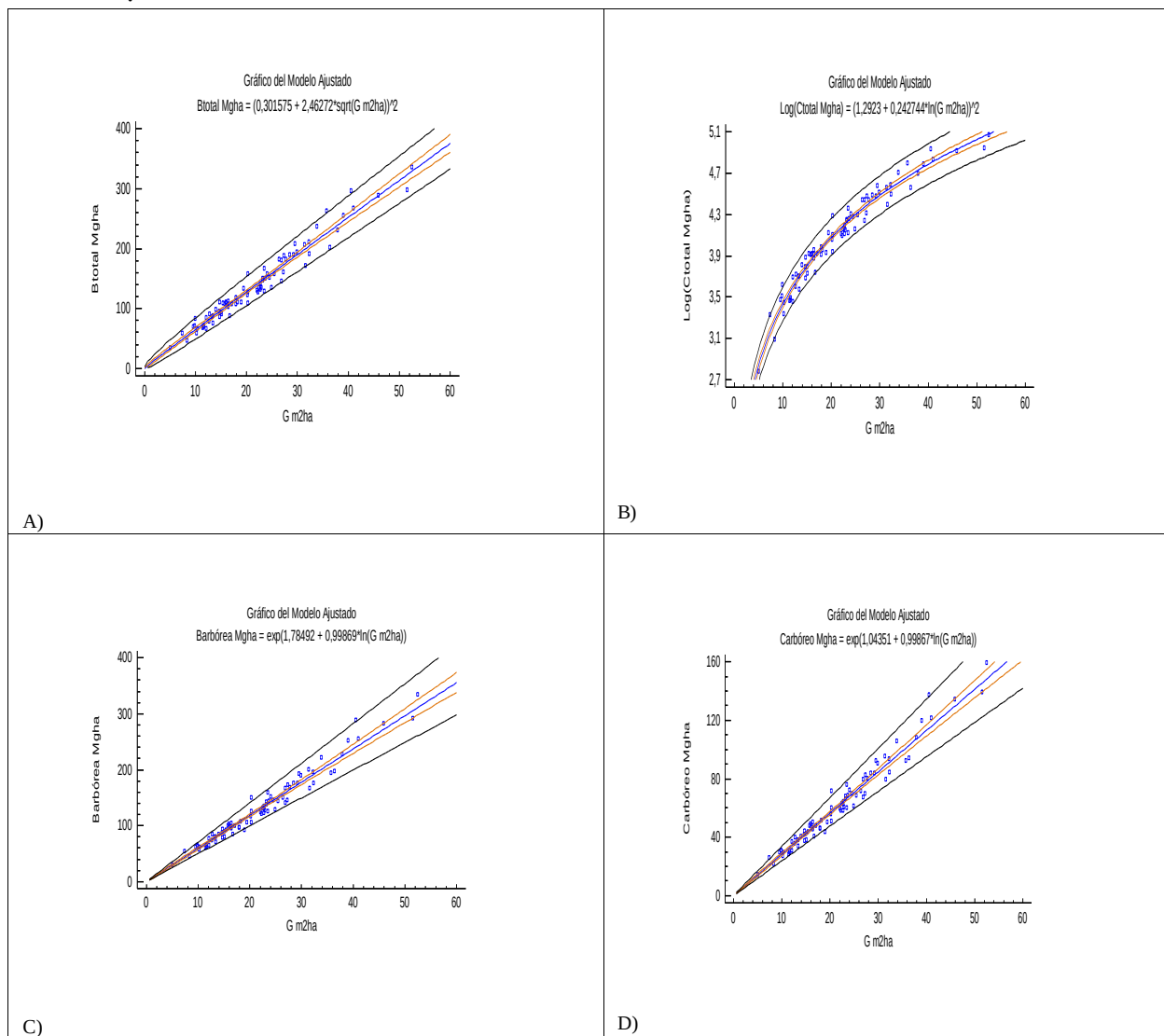


Figura 11. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosque seco: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa en árboles, d) carbono en árboles.

Cuadro 6. Modelos para estimar biomasa y carbono para el fuste y el árbol completo en bosques del pacífico central. Costa Rica, 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
$B_{total} = \text{Exp}(-1,6203 + 2,30583 \cdot \ln(Dap))$	97,37	0,328	0,26522	1,8251 ($P=0,1984$)	75	5,5	6,65
$C_{total} = \text{Exp}(-2,45614 + 2,30938 \cdot \ln(Dap))$	97,37	0,328	0,26572	1,82617 ($P=0,1997$)	75	5,4	5,83
$B_{fuste} = \text{exp}(-2,24847 + 2,30269 \cdot \ln(Dap))$	96,56	0,376	0,29339	1,83615 ($P=0,2122$)	75	7,3	5,99

B_{total} , C_{total} , B_{fuste} , C_{fuste} , Dap , $\ln$, R^2 , EEE, EMA, DW, n, E% y AIC definidos al pie del Cuadro 2.

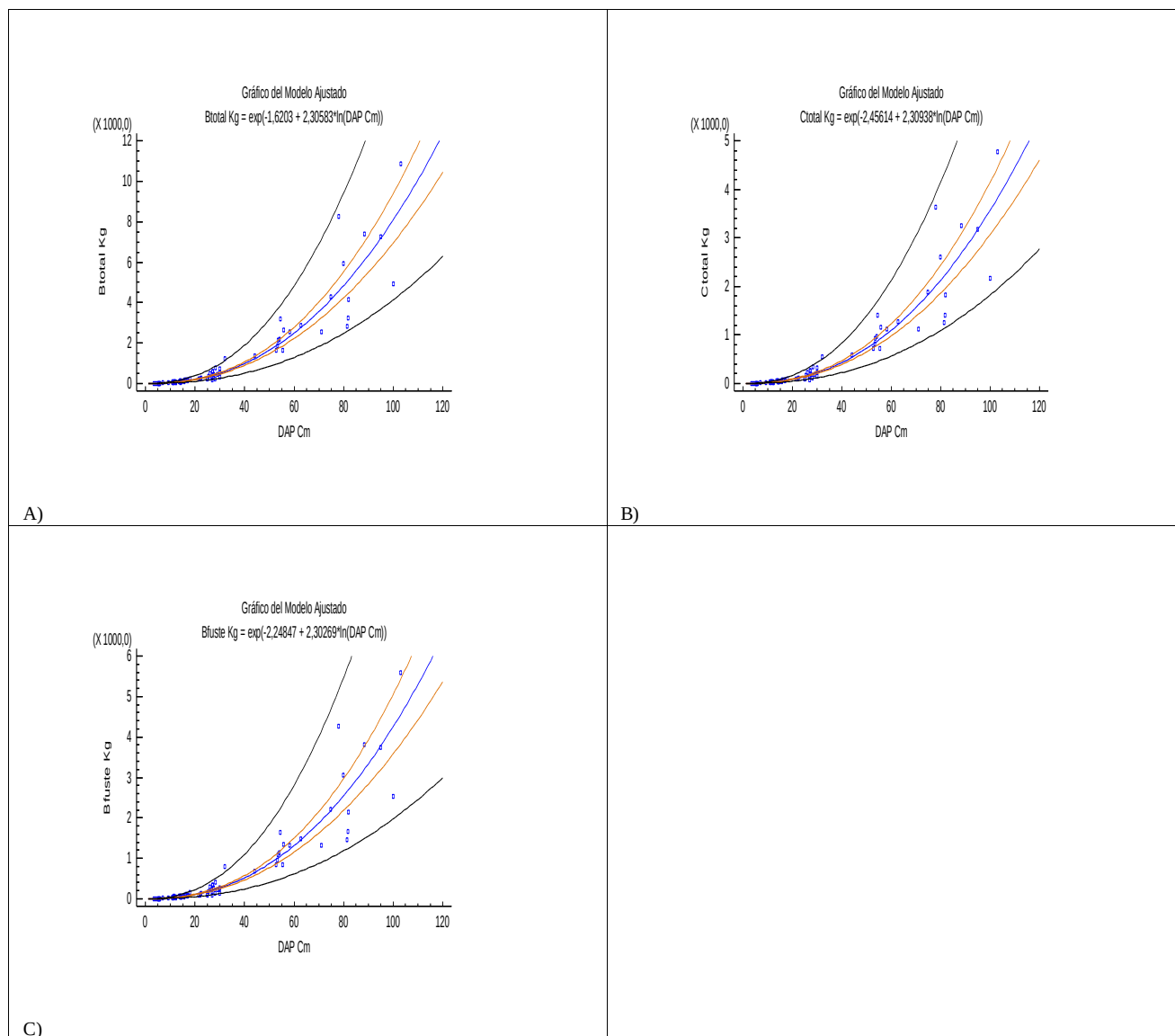


Figura 12. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol en bosques del pacífico central: a) biomasa total, a) carbono total, c) biomasa del fuste.

Cuadro 7. Modelos para estimar biomasa vegetal y carbono en la biomasa vegetal para el ecosistema en bosques del pacífico central. Costa Rica, 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
Total = $1/(0,000450933 + 0,108525/G)$	93,18	0,0006	0,0005	2,48528 ($P=0,9510$)	50	- 1,36	4,22
Ctotal = $1/(0,000411285 + 0,181226/G)$	93,76	0,0009	0,0007	2,59227 ($P=0,9803$)	50	- 1,20	3,74
Barborea = $1/(-0,000281847 + 0,139437/G)$	95,70	0,0006	0,0005	2,70532 ($P=0,9938$)	50	0,22	4,00
Carboreo = $1/(-0,000319492 + 0,212027/G)$	95,23	0,0009	0,0007	2,72238 ($P=0,9949$)	50	- 0,17	3,57

Btotal: biomasa vegetal total (árboles, vegetación herbácea y necromasa) en Mg/ha, Ctotal: carbono en la biomasa vegetal total (árboles, vegetación herbácea y necromasa) en Mg/ha. Barborea, Carboreo y G, definidos al pie del Cuadro 3. R^2 , EEE, EMA, DW, n, E% y AIC definidos al pie del Cuadro 2.

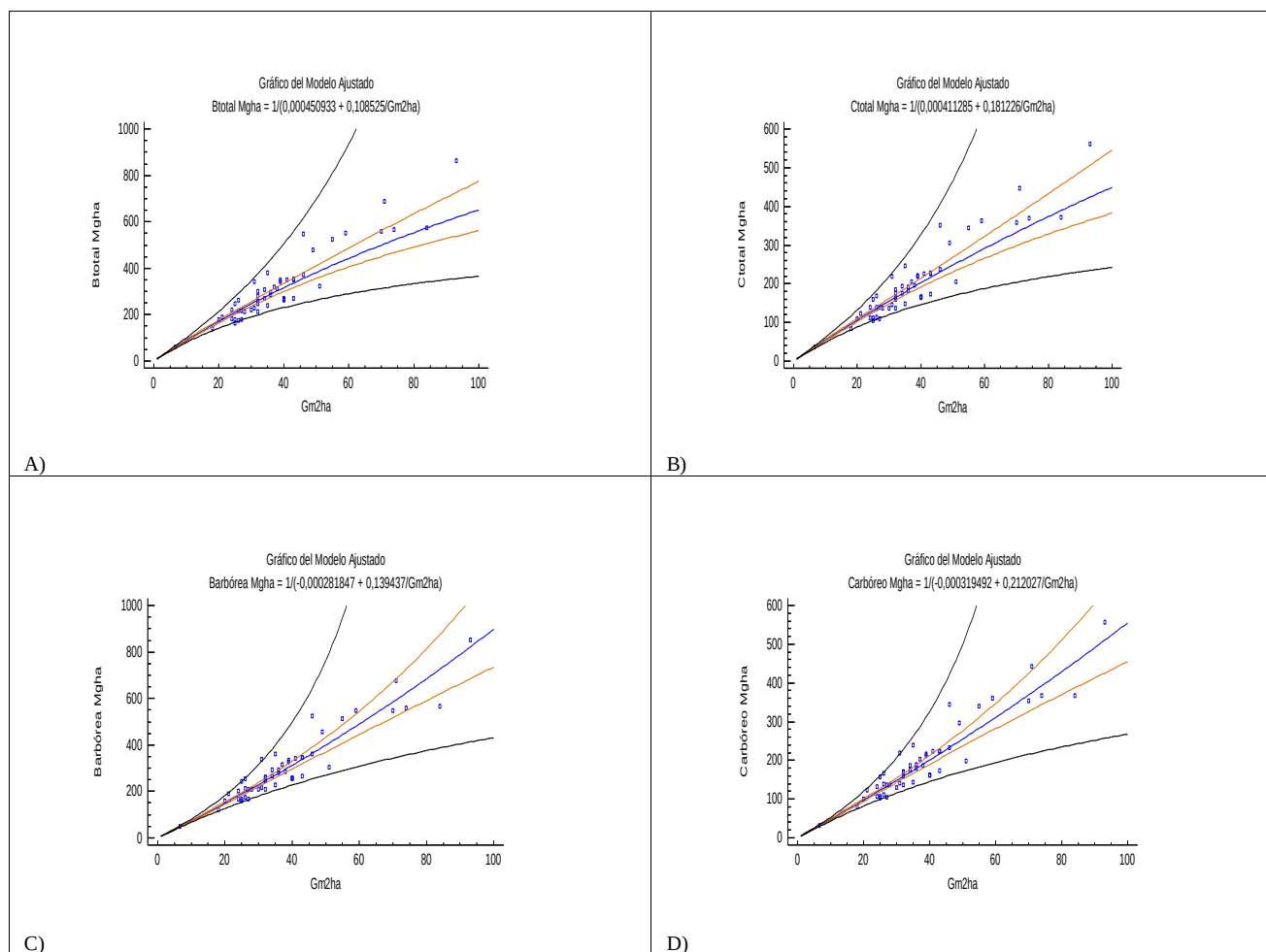


Figura 13. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosques del pacífico central: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa en árboles, d) carbono en árboles.

Cuadro 8. Modelos para estimar biomasa y carbono para el fuste y el árbol completo en bosques de la zona norte. Costa Rica, 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
$\text{LOG}(\text{Btotal}) = (0,553329 + 0,556121 \cdot \ln(\text{Dap cm}))^2$	89,10	0,116	0,0933	1,60649 ($P=0,0197$)	108	9,6	5,83
$\text{Ctotal} = \exp(-2,90038 + 2,39364 \cdot \ln(\text{Dap cm}))$	88,39	0,422	0,5311	1,57253 ($P=0,0118$)	110	10,2	5,85
$\text{B fuste} = \exp(-2,40077 + 2,2893 \cdot \ln(\text{Dap cm}))$	86,63	0,551	0,4468	1,63231 ($P=0,0262$)	110	11,0	6,02
$\text{Cfuste} = \exp(-3,20732 + 2,28979 \cdot \ln(\text{Dap cm}))$	86,66	0,550	0,4468	1,63298 ($P=0,0264$)	110	11,0	5,21

Btotal, Ctotal, Bfuste, Cfuste, Dap, ln, R^2 , EEE, EMA, DW, n, E% y AIC definidos al pie del Cuadro 2.

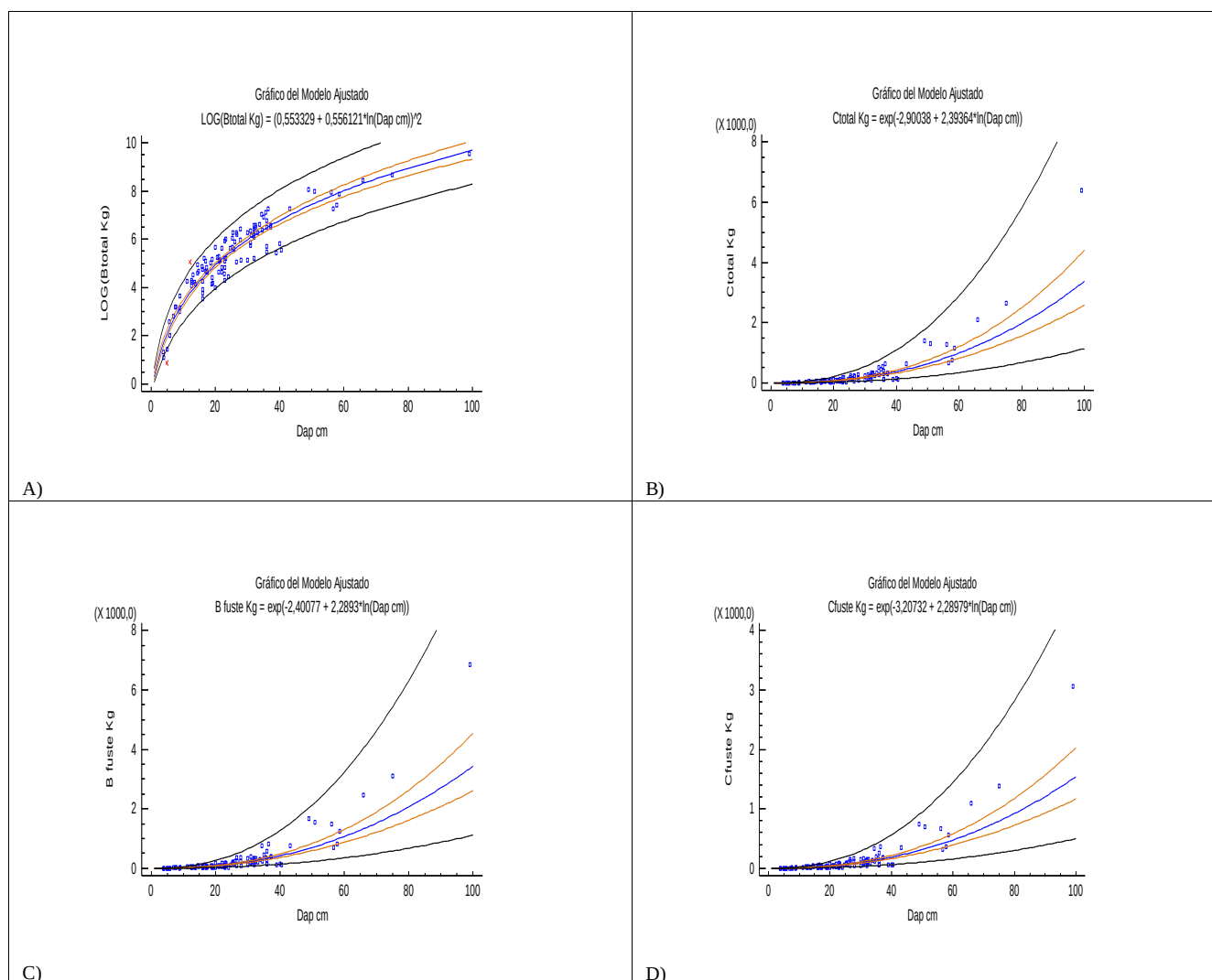


Figura 14. Modelos para estimar biomasa y carbono por árbol en bosques de la zona norte: a) biomasa total, a) carbono total, c) biomasa del fuste, d) carbono del fuste.

Cuadro 9. Modelos para estimar biomasa vegetal y carbono en la biomasa vegetal para el ecosistema en bosques de la zona norte, Costa Rica. 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
$B_{total} = 17,088 + 8,30418 * G$	91,37	29,760	22,527	1,74527 ($P=0,1370$)	54	4,19	3,38
$C_{total} = 5,02746 + 3,74799 * G$	93,30	11,720	9,059	1,61807 ($P=0,0573$)	54	2,84	2,46
$\text{Log}(\text{Barborea}) = (1,40886 + 0,272738 * \ln(G))^2$	97,92	0,033	0,026	1,66501 ($P=0,0812$)	54	0,85	3,28
$\text{Carboreo} = \exp(0,999171 + 1,06795 * \ln(G))$	97,44	0,1432	0,118	1,43679 ($P=0,0112$)	54	0,98	2,39

B_{total} , C_{total} , Barborea , Carboreo y G , definidos al pie del Cuadro 7. R^2 , EEE, EMA, DW, n, E% y AIC definidos al pie del Cuadro 2.

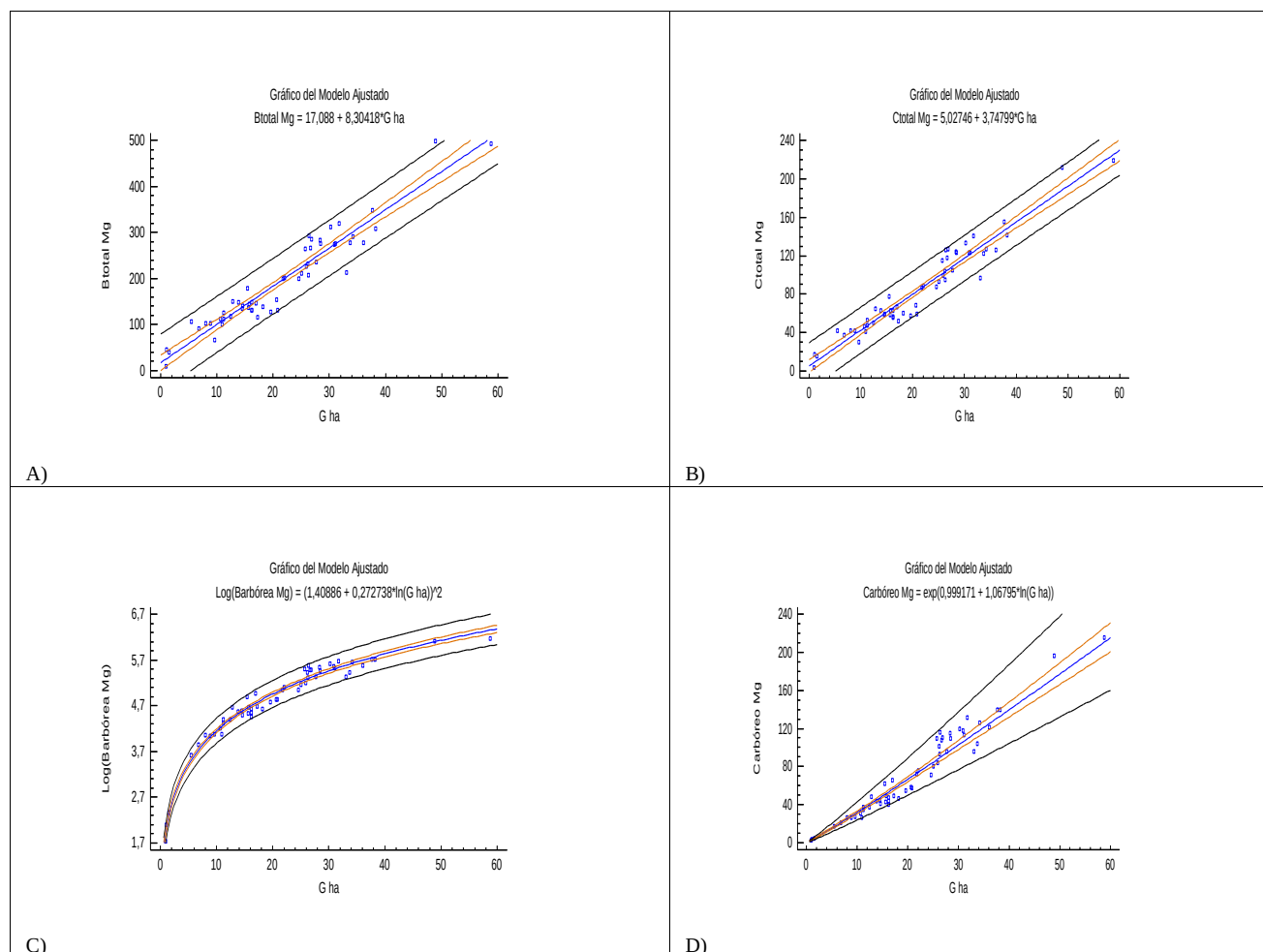


Figura 15. Modelos para estimar biomasa y carbono por hectárea en bosques de la zona norte: a) biomasa total, b) carbono total, c) biomasa en árboles, d) carbono en árboles.

4.2. Modelos de volumen

Para las cuatro zonas del estudio se elaboró un modelo para estimar el volumen total del fuste a partir del diámetro normal. El rango diamétrico para construir los modelos y el número de especies varió según la zona, según se indicó en la metodología (**Cuadro 1**). El ajuste logrado (R^2) fue muy satisfactorio, la menor cifra fue para el modelo de la zona norte, mientras que en las otras zonas el superó R^2 el 91%. Para todo los modelos el error de predicción no superó el 7,5% (**Cuadro 10, Figura 16**).

Cuadro 10. Modelo para estimar volumen total para bosque de altura, bosque seco, bosques de pacífico central y zona norte. Costa Rica, 2016. Todos los modelos poseen una $P < 0,0001$.

Sitio	Modelo	R^2	EEE	EMA	DW	n	E%	AIC
Bosque altura	$\text{Vol m}^3 = \exp(-8,60246 + 2,34706 * \ln(\text{Dapcm}))$	92,94	0,3619	0,2717	1,49968 ($P=0,0053$)	94	7,5	-1,13
Bosque seco	$\text{Vol m}^3 = (-0,573634 + 0,22709 * \sqrt{(\text{Dapcm})})^2$	91,03	0,0844	0,0643	1,95714 ($P=0,4125$)	107	7,3	-2,19
Pacífico central	$\text{Vol m}^3 = \exp(-8,3585 + 2,25189 * \ln(\text{Dapcm}))$	94,91	0,2621	0,2244	1,83699 ($P=0,2718$)	33	3,4	-5,06
Zona norte	$\text{Vol m}^3 = \exp(-7,91501 + 2,16331 * \ln(\text{Dapcm}))$	89,22	0,3377	0,2442	1,78684 ($P=0,1389$)	88	6,7	-0,45

4.3 Porcentaje (fracción) de carbono en la biomasa

En las cuatro zonas estudiadas la fracción de carbono en las hojas osciló entre 35,9% (pacífico central) y 39,1% (bosque seco). En los componentes leñosos vivos (fuste, ramas y raíz) la fracción de carbono osciló entre 41,8% (raíz en zona norte) y 45,6% (fuste y raíz en bosques de altura). La vegetación herbácea varió entre 35,3% en la zona norte y 38,5% en el pacífico seco. La hojarasca presentó el porcentaje de carbono más bajo en bosque seco (33,3%) y el más alto en el pacífico central (37,0%), mientras que en la necromasa gruesa el valor más bajo se mostró en la zona norte (35,3%) y el más alto en bosque seco (38,5%). Todos estos valores fueron estimados con un error máximo de 9,1% (ramas en la zona norte), mientras que el porcentaje de carbono en el suelo presentó un error más alto ($E\%=16,8$ en el bosque seco) (**Cuadro 11**).

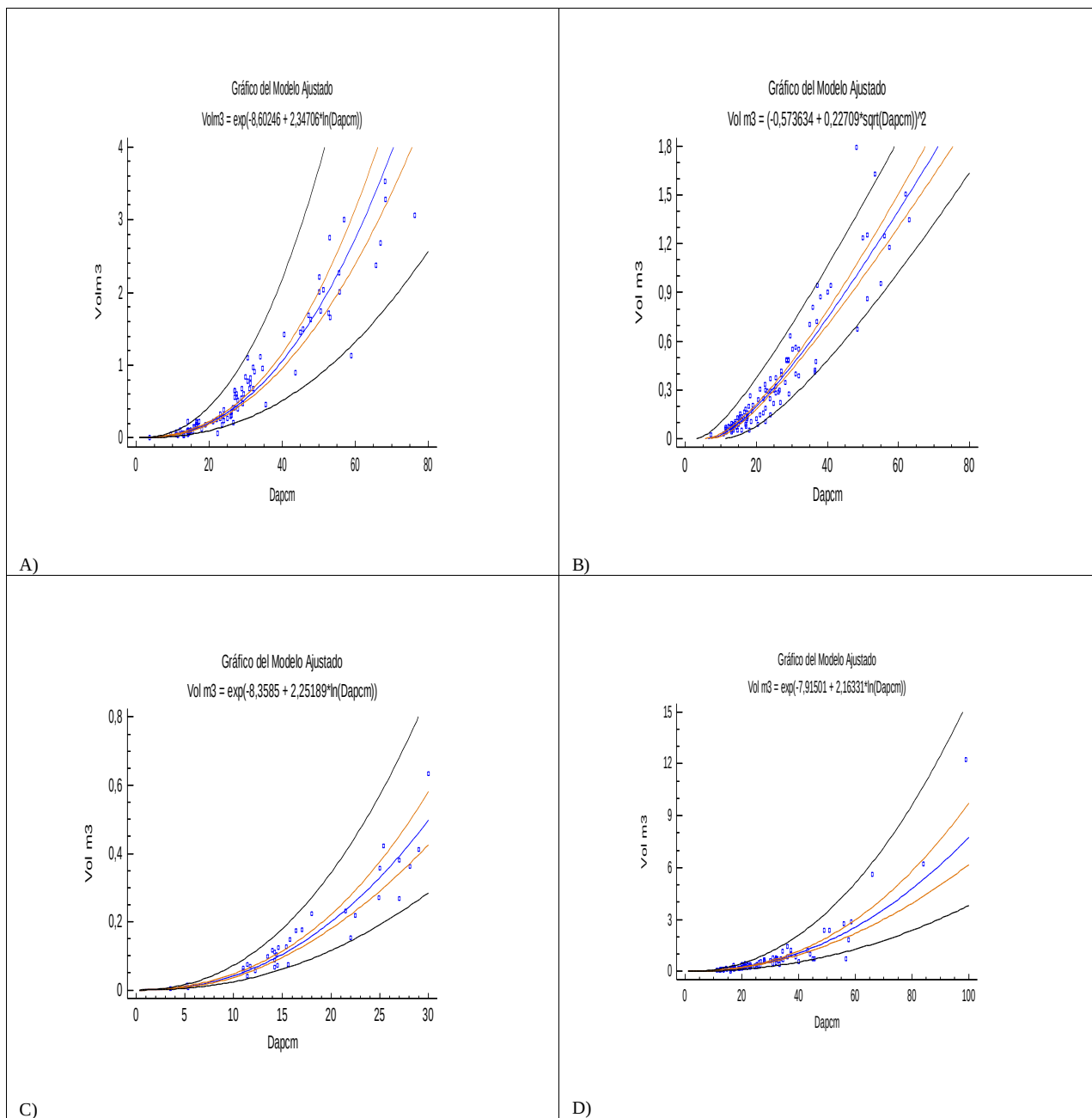


Figura 16. Modelos para estimar el volumen del fuste en: a) zona de altura, b) pacífico seco, c) pacífico central, d) zona norte.

Cuadro 11. Fracción de carbono por componente de biomasa y en el suelo.

Zona	Estadístico	Hojas	Ramas	Fuste	Raíz	Necro- masa	Vegetación herbácea	Hojarasca	Suelo
Pacífico central	X	35,9	44,6	43,9	44,4	43,9	37,9	37,0	4,1
	n	61	61	61	32	35	36	33	31
	S	5,3	5,4	7	3,9	6,2	3,7	3,7	1,2
	E%	3,8	3,1	4,1	3,2	5,3	3,3	3,5	14,2
Bosque altura	X	37,2	44,1	45,6	45,6	44	37,7	36,8	4
	n	108	89	106	46	50	41	36	51
	S	5,34	3	4,13	4,3	5,3	3,7	4,2	1,7
	E%	2,9	1,4	1,8	2,8	3,5	3,1	3,9	11,7
Bosque seco	X	39,1	42,7	42,5	42,8	42,6	38,5	33,3	2,2
	n	46	30	31	37	26	18	27	48
	S	6,37	4,9	5,8	5,39	5	3,3	5,5	1,17
	E%	6	7,9	6,6	4,4	4,7	4,2	6,5	16,8
Zona Norte	X	36,7	45,0	44,7	41,8	45,2	35,3	34,2	2,9
	n	66	34	42	34	11	16	12	20
	S	6,02	4,4	4,5	3,9	5,9	4,07	3,6	1
	E%	4	3,4	3,1	3,3	9,1	6,1	7	3,1

X: Promedio, n: tamaño de la muestra, S: desviación estándar, E%: error de muestreo.

5. Costos totales y financiamiento

El costo total del trabajo realizado fue de alrededor \$345469, que corresponde a rubros de personal, viáticos, transporte, análisis de laboratorio, equipo y materiales. De este monto GIZ aportó la suma de 141043 euros (aproximadamente \$170000,0.).

6. Problemas durante la ejecución

Los inconvenientes ocurridos durante la ejecución del proyecto ocurrieron en dos líneas:

- Dificultad para acceder a los sitios donde se ubican los bosques: aunque se contó con el respectivo permiso o pasaporte científico otorgado por la administración central del SINAC, diferentes jefes regionales no acataron el mismo, lo cual se convirtió en un obstáculo y en algunos casos no se permitió el ingreso a fincas ni para montar parcelas, en otros sí, pero no se podía extraer muestras. Igual sucedió con las fincas que estaban bajo pago de servicios ambientales, el FONAFIFO no autorizó el ingreso a las mismas argumentando que permitir la corta de árboles para el estudio era propiciar la deforestación. En este caso tampoco se pudo acceder a las bases de datos para ubicar con mayor facilidad los sitios con bosque. A las fincas privadas fue difícil el ingreso

debido al temor de los propietarios de una demanda por parte del MINAE, en muchos casos se tuvo que ir donde del propietario con un funcionario del SINAC.

- b. Un segundo inconveniente fueron los problemas administrativos por parte de GIZ: Hubo un cambio en la liquidación de adelantos que retrasó el proceso, por convenio se debió liquidar solamente las que superaban un monto de \$ 3000,0 y después hubo que liquidarlas todas sin importar el monto. Una vez realizada la liquidación parte de la FUNDAUNA, GIZ tardaba mucho tiempo en realizar la revisión y hacer el siguiente desembolso.

Los inconvenientes citados anteriormente provocaron mayor demanda de tiempo para realizar el trabajo de campo, no se pudo muestrear bosques de interés y que el proyecto no tuviera recursos de operación por algún lapso de tiempo desarrollándose al mínimo las actividades de campo y oficina.

7. Análisis y valoración

7.1 Estructuras del organismo ejecutor del proyecto e identificación de grupo destinatario con el proyecto

El proyecto fue desarrollado por el grupo de investigadores de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, al amparo del proyecto de investigación titulado “Manejo del cambio climático a través del sector forestal en Costa Rica”. Además hubo participación de estudiantes de la carrera de Ingeniería Forestal ofertada por la misma Escuela.

Los recursos económicos aportados por GIZ para el desarrollo del proyecto fueron gestionados por la FUNDAUNA.

La información generada con el proyecto será de gran utilidad para la toma de decisiones en relación a la cuantificación actual y futura del stock de carbono presente en los bosques de Costa Rica. En este sentido, el MINAE y todas sus dependencias (Instituto Meteorológico Nacional, Sistema Nacional de Áreas de Conservación, Fondo Nacional de Financiamiento Forestal, entre otras) tendrán información disponible pertinente para sus evaluaciones.

Otro grupo destinatario de los resultados es el compuesto por la empresa privada propietaria de bosques y los profesionales y estudiantes, que están participando o podrán participar, en la realización y seguimiento de estudios relacionados con el mercado del carbono.

7.2 Métodos y procedimientos de trabajo (valoración técnica)

Los métodos y técnicas utilizadas para el levantamiento de información de campo y durante el procesamiento y análisis de información son ampliamente reconocidos y aceptados a nivel mundial. Para el trabajo de campo el muestreo destructivo para cuantificar la biomasa es el que genera resultados más precisos, pero la inversión de tiempo y recursos es alta, aún en la etapa de laboratorio. Lo importante de resaltar aquí es que una vez que se cuenten con los modelos matemáticos para estimar la biomasa o el carbono, las estimaciones por árbol o por hectárea requieren de variables muy sencillas (diámetro o área basal) de determinar en campo o en oficina.

7.3 Costos y beneficios

La creación de estas bases de datos requirió de mucho esfuerzo en trabajo de campo y a nivel económico, así como un nivel de participación de muchos actores. Debido a que el proceso para la creación de esta herramienta fue largo y laborioso es necesario realizar una etapa intensiva de divulgación de los resultados.

7.4 Repercusiones sobre el grupo de destinatario/región/país (en particular para las mujeres de la región del proyecto)

7.4.1 Repercusiones económicas

Esta investigación es fundamental para que los usuarios finales de la información puedan ahorrar costos en la estimación de biomasa y carbono en sus fincas y propiedades, se espera que esta información pueda aportar al desarrollo de proyectos de compensación por medio del mercado doméstico de carbono, permitiéndole a los gestores de los recursos forestales de la zonas lograr un ingreso adicional en relación al Pago de Servicios Ambientales (PSA), principalmente en los bosques que no han sido sujetos de PSA por medio de FONAFIFO.

7.4.2 Repercusiones socioeconómicas y eventualmente socioculturales

Debido a que la fase de campo del proyecto se desarrolló completamente en zonas alejadas del país, en todos estos lugares se contrataron lugareños para apoyar las actividades del proyecto. Además, en las reservas privadas, públicas y hoteles que colaboraron con el proyecto se brindaron charlas sobre la importancia de este a nivel nacional, actualmente muchos de estos grupos están a la espera de los resultados para utilizarlos como parte de su gestión.

7.4.3 Repercusiones ecológicas

En este caso el estudio se realizó acatando todas las disposiciones del SINAC, especialmente aquellas relacionadas a la extracción de especies vedadas o en peligro de extinción. El grado de alteración en cada sitio de muestro fue imperceptible ya que se extrajo menos de cuatro árboles y de los más pequeños por parcela y a los más grandes se les estimó la biomasa en pie. El estudio generó información muy valiosa para la cuantificación del carbono almacenado en los bosques de manera muy sencilla y sin necesidad de provocar ninguna alteración al ecosistema. Esta es la base para que se incentive un mercado de carbono a nivel de país, que puede propiciar el manejo sostenible de los bosques.

8. Conclusiones

8.1 Sobre el aporte financiero como instrumento de cooperación para el desarrollo

El desarrollo de investigación casi siempre conlleva una alta inversión de tiempo y de recursos, máxime cuando se trata de trabajos en campo, en donde el investigador y sus colaboradores no pueden controlar situaciones ambientales (lluvias, altas temperaturas) y se depende de la autorización de terceras personas para poder levantar la información. Estas circunstancias encarecen el costo de los estudios y que para la mayoría de los países en desarrollo es muy difícil desarrollarlos por los escasos recursos. Es aquí en donde la cooperación internacional es necesaria siempre que se haga de una forma planificada y controlada.

8.2 Sobre el grupo destinatario, región-país, para futuras acciones de desarrollo

Se recomienda realizar un programa (software) en el cual los usuarios de esta información puedan hacer uso de la misma de una manera sencilla y asegurándose de que no se incurra en errores en el uso de las ecuaciones o por la estimación incorrecta de las variables predictivas del modelo.

9. Literatura citada

- Álvarez, E; Marín; MA. 2011. Manual de procedimientos analíticos para suelos y plantas. México. Universidad Autónoma de Chapingo. 65 p.
- Díaz, R; Mireles, M; Carrillo, F; Rodríguez B; Flores, E; Etchevers; J. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* schl. et cham. Madera y Bosques 13 (001):25-34.
- Fonseca, W. 2009. Restauración forestal y almacenamiento de carbono en el trópico húmedo. Tesis Ph D. CR, Universidad de Alcalá, España. 191 p.
- Krebs JC. 1985. Ecología: Estudio de distribución y abundancia. México. Segunda edición. Harla México. 753 p.
- MacDicken, KG.1997. A Guide to Monitoring Carbon Storage in Forestry and Agroforestry Projects. Forest Carbon Monitoring Program. 87 p.
- MFR (Ministry of Forests and Range). 2008. Scaling Manual, Smalian's Formula. 11 p.

