

Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica¹

A través del uso de ecuaciones alométricas se estimó el contenido de biomasa total y el carbono almacenado para un bosque húmedo tropical en la zona atlántica de Costa Rica.

Milena Segura,
Markku Kanninen,
Marielos Alfaro,
José Joaquín Campos



Foto: Unidad de Manejo de Bosques Naturales/CATIE

¹ Basado en: Segura, M. 1999. Valoración económica del inicio de fijación y almacenamiento de carbono en fincas privadas ubicadas en Sarapiquí y Guápiles, del Area de Conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica

Resumen

Se cuantificó el carbono fijado y almacenado en los bosques húmedos tropicales ubicados en la Zona Atlántica de Costa Rica. A partir de la medición directa de la biomasa sobre el suelo de individuos de siete especies forestales se elaboraron ecuaciones alométricas para obtener la biomasa total y la cantidad de carbono almacenado para este tipo de bosque.

El factor de expansión de biomasa y la cantidad de biomasa total para las especies en estudio coinciden con los reportados por la literatura (1,6 y 172 t ha⁻¹) para los bosques húmedos tropicales. Los modelos que ajustaron mejor la biomasa total fueron los elaborados en función del dap, el volumen y la biomasa del fuste; en todos se usaron transformaciones logarítmicas. El ajuste de las ecuaciones alométricas a los datos de estimación de la biomasa total es más adecuado y predice mejor para las clases diamétricas entre 60 y 105 cm dap y entre 15 y 44 m de altura total.

Abstract

The sequestration carbon was quantified in tropical humid forests of the Atlantic region of Costa Rica. From direct measurements of aboveground biomass of individual trees of seven forest species, allometric equations were derived to estimate total biomass and carbon stored in this type of forest.

The biomass expansion factor (BEF) and total biomass for the species studied coincide with those reported by the literature (1.6 and 172 t ha⁻¹) for tropical humid forests. The models that best predicted total biomass were logarithmic transformed functions of dbh, volume and shaft biomass. The allometric equations are most useful for estimating and predicting total biomass of trees within diameter classes of 60 to 105 cm dbh and 15 to 44 m in total height.

Palabras claves: carbono almacenado, estimación de biomasa, factor de expansión de biomasa, modelos alométricos, tasa de fijación de carbono.

Los inventarios forestales han sido utilizados como punto de partida para las estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales Brown y Lugo (1992) utilizaron datos de inventarios forestales para estimar biomasa en la Amazonia de Brasil. Kauppi *et al.* (1992) utilizaron datos de inventarios para estimar biomasa y carbono en los bosques de Europa. En algunos casos, se generaron ecuaciones para la estimación de biomasa con base en datos de inventarios forestales (Brown 1997).

Se han realizado algunas investigaciones en carbono en parcelas permanentes de muestreo (PPM) en bosques naturales (Brown *et al.* 1989, Brown y Lugo 1992). Cairns y Megganck (1994) reportan, en promedio, entre 155 y 187 tC ha⁻¹ para los bosques húmedos tropicales, entre 27 y 63 tC ha⁻¹ para el bosque seco y 90 tC ha⁻¹ en el bosque boreal.

Una de las principales limitaciones en la investigación fue la falta de información adecuada sobre las características de cada bosque, por lo que debieron utilizarse los datos de biomasa de otros sitios bajo condiciones similares. Por otra parte, aunque las PPM han sido un instrumento útil para generar estudios

detallados de los ecosistemas forestales, las áreas de bosque natural estudiadas no cuentan con PPM; además, el objetivo de manejo de estas áreas antes de los 90 fue la extracción de madera y desde hace una década, el manejo forestal sostenible.

El contenido de biomasa puede estimarse mediante métodos directos o indirectos. El primero, más destructivo, consiste en cortar el árbol y determinar la biomasa pesando directamente cada componente (Araújo *et al.* 1999). El segundo utiliza métodos de cubicación donde se suman los volúmenes y se toman muestras de madera, las que se pesan en el campo para calcular los factores de conversión de volumen a peso seco (Segura 1997). Otra forma de estimar la biomasa es a través de ecuaciones y modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión entre las variables colectadas en el campo y en inventarios forestales (dap, altura comercial y total y crecimiento diamétrico, entre otros) (Araújo *et al.* 1999, Brown 1997).

El objetivo del presente estudio fue elaborar ecuaciones alométricas para estimar el contenido de biomasa total y el carbono almacenado y fijado anualmente para bosques húmedos tropical es en la zona Atlántica de Costa Rica.

Métodos

Área de estudio El estudio se realizó en las dos áreas experimentales: Tirimbina Rain Forest Center, en Sarapiquí, Heredia, localizada a 160 y 220 msnm (Quirós y Finegan 1994) y Los Laureles de Corinto, en Limón, con una precipitación anual de 4000 mm y una temperatura media mensual de 23,7°C (Quirós 1998).

Además se seleccionaron 10 fincas con bosque natural ubicadas en un radio de 10 km, que contaran con inventario forestal y censo comercial. Para medir directamente la biomasa, se eligieron dos fincas en las que ya se había hecho aprovechamiento comercial.

En estos bosques predominan las especies *Pentaclethra macroloba*, *Brosimum guianense* y *Carapa guianensis*, entre otras, y corresponden a la zona de vida bosque muy húmedo tropical.

Selección de las especies para el muestreo Mediante el análisis de las PPM de las dos áreas experimentales se identificaron las especies dominantes según el criterio de área basal por tratamientos silviculturales. Luego se eligieron las especies en ambos bosques; si no había un ejemplar para muestra se tomaba la especie siguiente.

Se muestrearon 19 individuos de siete especies: tres de *Carapa guianensis*, tres de *Inga coruscans*, dos de *Laetia procera*, cuatro de *Pentaclethra macroloba*, uno de *Stryphnodendron microstachyum*, tres de *Tapirira guianensis* y tres de *Vochysia ferruginea*. La biomasa de cada árbol se dividió en cuatro componentes: volumen y biomasa del fuste comercial, ramas grandes (diámetro >11 cm), ramas pequeñas (diámetro <11 cm), tocón y trozas no comerciales (por defectos naturales o por pudrición).

Además, se tomaron muestras de 23 individuos para cuantificar la fracción de carbono con el método de calorimetría (Eduarte y Segura 1999) y de 20 para determinar la gravedad específica, con el fin de realizar las conversiones de volumen a biomasa y obtener la cantidad de carbono almacenado por árbol.

Se calculó el Factor de Expansión de Biomasa (FEB), que es la relación entre la biomasa total y la biomasa del fuste. Este factor se utiliza para estimar la biomasa total a partir de la biomasa del fuste.

En las PPM se estimó el incremento volumétrico y la cantidad de biomasa y de carbono almacenado por árbol, a partir de los 10 cm de dap, así como la tasa de fijación del carbono (TFC). En los bosques de las fincas, se calculó la biomasa y el carbono almacenado por individuo y por finca, a partir de los inventarios forestales y los censos comerciales. Para calcular la TFC se consideró que su incremento es proporcional al de las PPM. Tanto en las PPM como en los bosques privados se obtuvo el volumen total por árbol utilizando el

modelo desarrollado para estos bosques, que utiliza el dap como variable independiente (Segura 1999).

Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa total y el carbono almacenado. Se desarrollaron algunos modelos para estimar la biomasa total y el carbono almacenado por árbol, a partir de variables como dap, altura comercial y total, biomasa y volumen del fuste. Todos los modelos lineales (logarítmicos, cuadráticos, potenciales y exponenciales) y sus transformaciones se probaron mediante el paquete Statistical Analysis System (SAS).

Los modelos de mejor ajuste se seleccionaron con base en los siguientes criterios: lógica biológica del modelo, coeficiente de determinación ajustado (R^2 -ajustado), coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de variación de la estimación (CV%) y prueba de F (análisis de variancia) para el modelo y para cada parámetro. También se probaron los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia mediante el análisis gráfico de los residuos de los modelos.

Se calculó el valor simulado, que corresponde al obtenido con los modelos de esta investigación, y se comparó con los valores reales de biomasa total. Además, se estimó la biomasa con la ecuación para bosques muy húmedos tropicales de Brown *et al.* (1989) y Brown (1992), citado por Brown (1997), para compararla con los valores reales.

El análisis estadístico comprendió las pruebas de normalidad y homogeneidad de las varianzas. Cuando hubo normalidad en la distribución

de los residuos y homogeneidad de las varianzas, se realizaron análisis de variancia con datos originales y transformados. En el caso contrario, se utilizaron pruebas no paramétricas, como la Prueba de Kruskal-Wallis. Para realizar estos procedimientos se utilizó el paquete SAS.

Resultados y discusión

Estimación de la biomasa por árbol. Para la clase diamétrica comprendida entre los 60 y los 70 cm, el promedio de biomasa total por árbol (incluye fuste comercial, tocón y ramas) fue de 4,3 t; para la clase diamétrica de 71-80 cm, el promedio fue de 5,4 t; para las clases siguientes, de 81-90 cm, 91-100 cm y >101 cm, la biomasa total promedio por individuo fue de 7,3, 9,06 y 11,98 t, respectivamente.

El factor de expansión de biomasa (FEB) promedio fue de 1,6, con una variación entre 1,3 y 2,2 y un coeficiente de variación del 15%. Esto significa que un 60% de la biomasa total corresponde a la biomasa del fuste. La especie que presentó el FEB más alto (2,0) fue *T. guianensis*; el FEB de menor valor (1,4) lo presentó *L. procera*. Estos resultados concuerdan con los reportados por Brown y Lugo (1984), que en un estudio en bosque húmedo tropical encontraron un FEB de 1,6.

La correlación entre la biomasa total y las variables de dap, volumen y biomasa de fuste fue relativamente alta ($r=0,83$, $r=0,92$ y $r=0,96$, respectivamente), lo que indica que podrían utilizarse para estimar la biomasa total. La correlación con la altura total y comercial fue baja. Los modelos que ajustaron mejor los datos pre-

Cuadro 1. Modelos de mejor ajuste para estimar biomasa total en función de la biomasa y volumen de fuste, dap, altura total y comercial y para estimar el carbono almacenado en función del dap.

Ecuación	Modelo	R^2	R^2 -ajust	C.V. (%)
Ec. 1	$\ln(BT) = 0,70 + 0,81 \cdot \ln(bf)$	0,92	0,91	6,4
Ec. 2	$\ln(BT) = 0,94 + 0,12 \cdot (vf)$	0,90	0,89	7,1
Ec. 3	$\ln(BT) = 0,77 + 2 \cdot 4 \cdot (d2)$	0,73	0,71	11,5
Ec. 4	$BT = -7,45 + 0,17 \cdot (d)$	0,68	0,66	23,8
Ec. 5	$\ln(BT) = -6,93 + 1,87 \cdot \ln(d) + 5 \cdot 3 \cdot \ln(d) \cdot ht$	0,88	0,87	7,7
Ec. 6	$\ln(BT) = -8,80 + 2,13 \cdot \ln(d) + 0,46 \cdot \ln(hc)$	0,80	0,77	10,3
Ec. 7	$\ln(CA) = -1,02 + 0,03 \cdot (d)$	0,71	0,69	20,8

R^2 : Coeficiente de determinación; R^2 -ajust: Coeficiente de determinación ajustado; C.V. (%): Coeficiente de variación; vf: Volumen de fuste (m^3); d: dap (cm); BT: Biomasa total (t); bf: Biomasa de fuste (t); ht: Altura total (m); hc: Altura comercial (m); CA: Carbono almacenado (t)

sentaron valores de R^2 y R^2 -ajustados, superiores a 0,73 y 0,71 respectivamente; tanto los parámetros como el modelo fueron significativos ($P < 0,05$) (Cuadro 1).

El modelo que mejor estimó la biomasa total a partir de la biomasa del fuste fue de tipo logarítmico, con coeficientes de determinación altos y un bajo coeficiente de variación; tanto el modelo como los parámetros fueron altamente significativos ($P < 0,05$) (Ecuación 1, Cuadro 1). Este modelo explica más del 90% de la variabilidad de las observaciones, aunque requiere información adicional, como la gravedad específica, para obtener la biomasa del fuste.

Cuando se utiliza el dap para estimar la biomasa total, algunos de los modelos probados explican en promedio un 71% de la variabilidad de los datos (Ecuaciones 3 y 4, cuadro 1). Sin embargo, la ventaja de este ti-

po de ecuaciones de una entrada es que los cálculos son muy simples; además, se trata de una variable que es fácil de obtener en el campo y que se registra en la mayoría de los inventarios forestales. La aplicación de las ecuaciones que incluyen el dap como única variable independiente es limitada y las estimaciones de biomasa sólo son válidas para este tipo de bosques; por lo tanto, se considera que el modelo tiene un bajo poder explicativo ($R^2 = 0,73$ y $0,68$) (Ecuaciones 3 y 4, Cuadro 1).

Cuando se combinan las variables altura total, altura comercial y dap, se obtienen modelos que se ajustan bien a los datos (Ecuaciones 5 y 6, Cuadro 1); cuando se utilizan ecuaciones de dos entradas (dap y altura) se consiguen estimaciones de biomasa más exactas. No obstante, estos modelos requieren medir la altura total y/o comercial de los árboles, lo

que resulta costoso y está sujeto a errores por varias razones: suele haber varios estratos, en muchos casos la copa del árbol no es completamente visible y se trata de estimaciones y no de mediciones directas.

Las ecuaciones evaluadas para estimar biomasa total aplican para diámetros entre 60 a 105 cm de dap y entre 15 a 44 m de altura total y 10 a 23 m de altura comercial. Los modelos no deben utilizarse para otros diámetros, porque se incurriría en errores.

En promedio, la cantidad de biomasa por árbol es de 3,09 t ($1,38 - 6,09$ t árbol⁻¹). Se presentó una alta variabilidad con un coeficiente de variación del 40%; esto podría estar influenciado por la forma del árbol y sobre todo, de la copa, así como por la altura total. La variación podría reducirse clasificando la forma de los árboles y desarrollando modelos es-

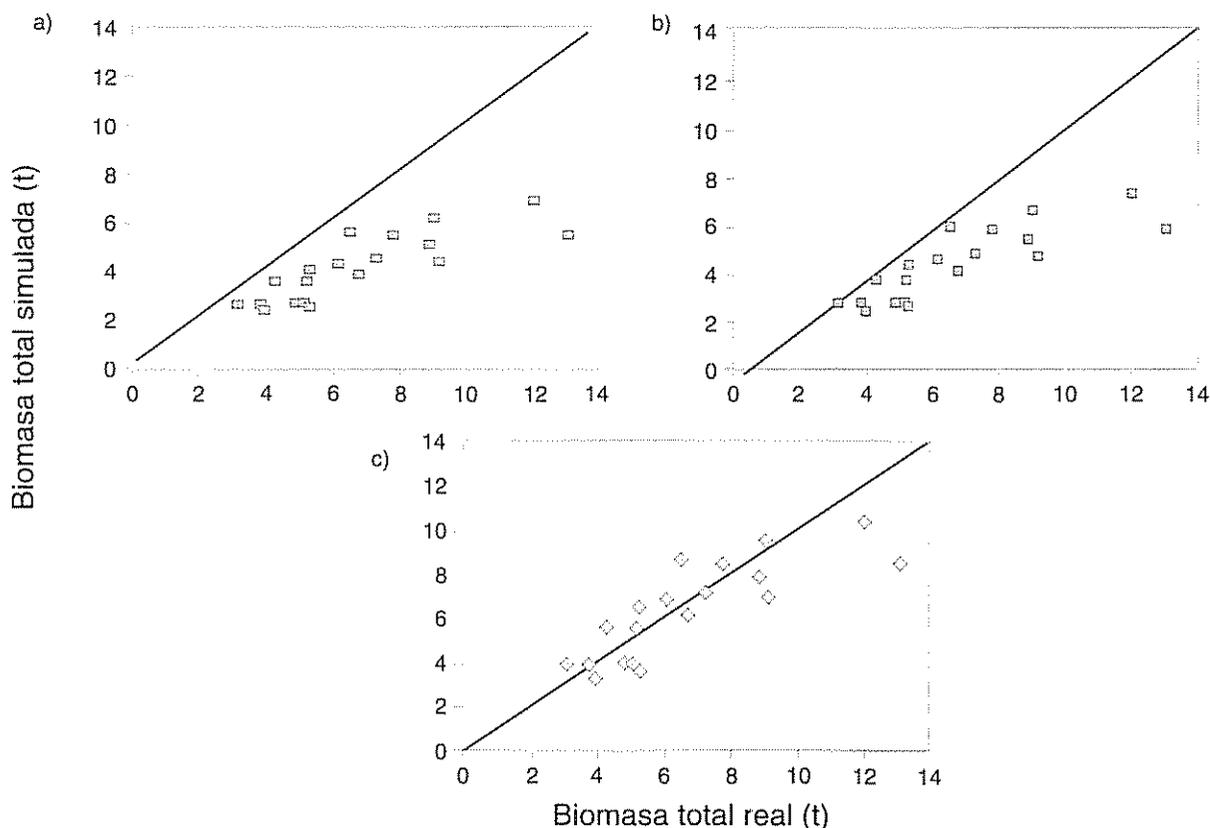


Figura 1 Biomasa total simulada vs biomasa total real para las especies muestreadas. a) Brown *et al.* (1989); b) Brown (1992), citado por Brown (1997); c) este estudio (Ecuación 4).



La biomasa total y el carbono almacenado son muy variables entre bosques de la misma zona

Cuadro 2. Biomasa total, carbono almacenado y tasa de fijación de carbono (dap 10 cm) en las PPM y en los bosques de Corinto y Tirimbina.

Corinto		B _t (t ha ⁻¹)	CA (tC ha ⁻¹)	TFC (tC ha ⁻¹ a ⁻¹ σ ⁻¹)
PPM	Promedio*	292,4 (39,3)	133,8 (18,0)	2,5
	1	185	80	1,4
	2	98	45	0,8
	3	112	52	0,9
Bosques Privados	4	154	71	1,2
	5	84	38	0,6
	6	69	32	0,5
	7	149	68	1,2
	Promedio	122	55	0,9
Tirimbina				
PPM	Promedio*	243,5 (26,0)	111,4 (11,9)	2,5
	1	48	22	0,4
Bosques privados	2	101	47	0,8
	3	59	27	0,5
	Promedio	69	32	0,8

PPM: Parcelas Permanentes de Muestreo; B_t: Biomasa total; CA: Carbono almacenado; TFC: Tasa fijación de carbono, () Desviación estándar.

pecíficos para cada tipo de forma. La relación entre la cantidad de carbono almacenado y el dap fue significativa ($P < 0,01$); se encontró que el modelo explica el 71% de la variabilidad de las observaciones y que los parámetros del modelo resultaron significativos ($P < 0,05$) (Ecuación 7, Cuadro 1).

Al comparar la biomasa total estimada en función del dap (Ecuación 4) con la biomasa total real, los valores simulados se distribuyeron uniformemente. Por otra parte, si se utilizan las ecuaciones propuestas por Brown *et al* (1989) y Brown (1992), citado por Brown (1997), los valores simulados muestran un sesgo, porque estos modelos subestiman la biomasa total, especialmente en árboles con diámetros grandes (Figura 1). Este desajuste podría deberse a diferencias en la muestra y entre los bosques con que se generaron los modelos. Es importante enfatizar que cada tipo de bosque tiene su producción de biomasa que lo diferencia de los demás, por eso, se debe tener precaución al utilizar ecuaciones para estimar biomasa total construidas para otro tipo de ecosistemas forestales.

Biomasa total, carbono almacenado y tasa de fijación en las PPM y en los otros bosques. La biomasa total estimada y el carbono almacenado en los bosques de las áreas experimentales (PPM) varió entre zonas ($P < 0,05$). En Corinto se reportó, en promedio, la mayor biomasa y carbono almacenado a partir de los 10 cm dap, superando en un 20% al área de Tirimbina (Cuadro 2).

Tanto la biomasa total como el carbono almacenado son muy variables entre bosques de la misma zona. Las PPM presentan los mayores valores; superan en un 150% (Corinto) y en un 110% (Tirimbina) a los bosques en las fincas con los menores valores (Cuadro 2).

La tasa de fijación de carbono (TFC) promedio para los bosques en fincas en ambas zonas fue similar y se encuentra entre 0,4 y 1,4 tC ha año⁻¹ (Cuadro 2); los valores mínimos se presentaron en la zona de Tirimbina. Estas diferencias podrían deberse a las diferencias en la gravedad especi-

fica de cada una de las especies y a que se consideraron incrementos diferentes dependiendo de las condiciones del bosque.

Si se compara la biomasa total y el carbono almacenado en las PPM y en los bosques privados (fincas), se observa que las PPM presentan valores más altos, los que son superiores en un 139% y en un 144% a los de los bosques de la zona de Corinto y en un 252% y un 247% a los de la zona de Tirimbina, respectivamente (Cuadro 2). Esta diferencia puede deberse a que los bosques en las fincas han sido sometidos a una mayor intensidad de extracción de madera desde hace tres décadas, lo que implica la pérdida de una gran cantidad del carbono almacenado en esos ecosistemas. En el caso de las PPM, estas sólo fueron aprovechadas en una oportunidad al inicio de la década, por lo que han mantenido el potencial de almacenamiento de carbono.

Conclusiones y recomendaciones

- El factor de expansión de biomasa (FEB) y la cantidad de biomasa total para las especies en estudio coincide con los reportados por la literatura: 1,6 y 172 t/ha⁻¹ para los bosques húmedos tropicales.
- Las ecuaciones para estimar el carbono almacenado en función del dap fueron significativas y los coeficientes de determinación explicaron un 71% de la variabilidad de los datos.
- Se presentaron diferencias en la

biomasa total y el carbono almacenado entre los sitios del estudio; esta fue mayor en Corinto que en Tirimbina, tanto en las PPM como en los bosques naturales.

- El contenido de carbono almacenado entre bosques de la misma zona varió según el manejo recibido. La tasa de fijación anual de carbono varió entre bosques (0,4 a 1,4 tC ha⁻¹ año⁻¹), dependiendo de la gravedad específica y de la fracción de carbono de las especies
- La biomasa total, el carbono almacenado y la TFC de las PPM superaron en más del 100% a los encontrados en los bosques privados, como resultado que en estos últimos ha habido una fuerte explotación maderera en los años anteriores.
- En futuras estimaciones de biomasa total para estos bosques se recomienda utilizar el modelo en función del dap, debido a que es una variable fácil de obtener y a que los inventarios forestales por lo general cuentan con esa información.
- Para estimar biomasa aérea se recomienda utilizar ecuaciones específicas para cada área boscosa, de acuerdo con sus características ecológicas e incluir árboles con dap menores de 60 cm, con el objetivo de obtener modelos que se ajusten con mayor confiabilidad a esas clases diamétricas.
- Para las estimaciones de carbono se recomienda dar prioridad a las mediciones de biomasa en el cam-

po, pues si esta se determina con precisión, se asegura una estimación más precisa de la cantidad de carbono acumulado. En segundo lugar, se recomienda hacer la determinación de la fracción de carbono y la gravedad específica con base en las especies dominantes en el ecosistema en estudio.

Milena Segura

Costa Rica

Proyecto Flujos de Carbono en América

Central

CATIE 7170, Turrialba, Costa Rica

Tel (506) 556 1754

Fax (506) 556 6255

E-mail: msegura@catie.ac.cr

Markku Kanninen

Director Programa de Investigación

CATIE 7170, Turrialba,

Costa Rica

Tel. (506) 556-1754

E-mail: kanninen@catie.ac.cr

Marielos Alfaro

Economista Forestal

Cámara Costarricense Forestal

Apartado Postal 1135-1002

San José-Costa Rica

E-mail: malfaro@sol.racsa.co.cr

José Joaquín Campos

Jefe Unidad de Manejo de

Bosques Naturales

CATIE 7170, Turrialba,

Costa Rica

Tel (506) 556-0401

E-mail: jcampos@catie.ac.cr

Literatura Citada

- Araujo, TM; Higuchi, N; De Carvalho Junior, JA. 1999. Comparison of formula for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará Brazil. *Forest Ecology and Management* 117: 43-52
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. FAO Montes 134. Roma 55 p.
- Brown, S.; Gillespie, AJR; Lugo, AE. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4): 381-902
- Brown, S.; Lugo, AE. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. *Science* 223: 1290-1293
- Brown, S.; Lugo, AE. 1992. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17(1): 8-27
- Cairns, M.A.; Meganck, RA. 1994. Carbon sequestration, biological diversity, and sustainable development: Integrated Forest Management. *Environmental management* 18(1): 13-22
- Eduarte, E.; Segura, MA. 1999. Determinación de carbono utilizando la calorimetría. *Ciencias Ambientales*. Universidad Nacional Heredia, Costa Rica. 15:54-55
- Kauppi, PE; Mielikainen, K; Kuusela, K. 1992. Biomass and carbon budget of European Forest, 1971 to 1990. *Science* 256: 70-71
- Quirós, D. 1998. Prescripción de un tratamiento silvicultural en un bosque primario intervenido de la zona atlántica de Costa Rica. *Manejo Forestal Tropical* N°5 9 p.
- Quirós, D.; Finegan, B. 1994. Manejo sustentable de un bosque natural tropical en Costa Rica: definición de un plan operacional y resultados de su aplicación. Programa Manejo Integrado de Recursos Naturales. CATIE Serie Técnica. Informe técnico N° 225 26 p.
- Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en Quercus costaricensis, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Costa Rica, Heredia 147 p.
- Segura, M. 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, Costa Rica. 115 p.
- Segura, M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en Quercus costaricensis, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis Licenciatura. Universidad Nacional Costa Rica, Heredia 147 p.
- Segura, M. 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, Costa Rica. 115 p.