



Revista de CIENCIAS AMBIENTALES

Tropical Journal of Environmental Sciences



**Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en
ecosistemas forestales tropicales**

**Review of Methods for the Monitoring of Biomass and Vegetal Carbon
in Tropical Forest Ecosystems**

William Fonseca-González^a

^a Doctor e ingeniero forestal, docente e investigador en la Escuela de Ciencias Ambientales e Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica, wfonseca@una.cr

Director y Editor:

Dr. Sergio A. Molina-Murillo

Consejo Editorial:

Dra. Mónica Araya, Costa Rica Limpia, Costa Rica
Dr. Gerardo Ávalos-Rodríguez. SFS y UCR, USA y Costa Rica
Dr. Manuel Guariguata. CIFOR-Perú
Dr. Luko Hilje, CATIE, Costa Rica
Dr. Arturo Sánchez Azofofeifa. Universidad de Alberta-Canadá

Asistente:

Rebeca Bolaños-Cerdas

Editorial:

Editorial de la Universidad Nacional de Costa Rica (EUNA)





Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales

Review of Methods for the Monitoring of Biomass and Vegetal Carbon in Tropical Forest Ecosystems

William Fonseca-González^a

[Recibido: 21 de febrero 2017; Aceptado: 25 de abril 2017; Corregido: 28 de mayo 2017; Publicado: 01 de julio 2017]

Resumen

La cuantificación de la biomasa vegetal es clave para conocer el carbono almacenado por los ecosistemas forestales y, por ende, la capacidad de mitigación del cambio climático. Existen variedad de métodos para estimar la biomasa, muchos de ellos con pequeñas variaciones, por ejemplo, el tamaño y forma de las unidades de muestreo, la inclusión o no de algún componente del reservorio (hojas, ramas, raíces, necromasa), diámetro mínimo inventariado, entre otras. El objetivo del manuscrito es explicar los aspectos más importantes a considerar en el inventario de remociones, a partir del diseño de inventario (diseño estadístico, tamaño y forma de las unidades de muestreo, componentes de la biomasa a evaluar). En un segundo punto se trata el tema de la determinación de la biomasa aérea y de raíces, haciendo referencia al método directo o destructivo y a los métodos indirectos, en especial al uso de modelos matemáticos por su fácil aplicación y bajo costo; además se anotan algunos modelos para bosque natural y plantaciones. También se hace referencia al estudio de carbono en suelos, a los factores de expansión de biomasa y a cómo determinar el carbono en la biomasa. Se espera que estas notas faciliten la comprensión del tema y que sean de referencia para el establecimiento de esquemas de monitoreo, reporte y verificación.

Palabras clave: Bosque natural, cambio climático, inventarios, mitigación, plantaciones.

Abstract

The quantification of vegetal biomass is the key to know the carbon that forest ecosystems store, and therefore, its capacity to mitigate climatic change. There is a variety of methods to estimate biomass, many with small variations, such as size and shape of sampling units, inclusion or not of any reservoir component (leaves, branches, roots, necromasses), minimum diameter inventoried, among others. The objective of the paper is to explain the most important aspects to be considered in the inventory of removals, based on the inventory design (statistical design, size and shape of the sampling units, components of the biomass to be evaluated). A second point deals with the determination of aerial biomass and roots, referring to the direct or destructive method, and indirect methods, especially to the use of mathematical models for their easy application and low cost; besides, some models for natural forest and plantations are noted. Reference is also made to the study of carbon in soils, biomass expansion factors, and how to determine carbon in biomass. We hope that these notes will facilitate the understanding of the topic and be a reference for the establishment of monitoring, reporting and verification schemes.

Key words: Climate change, inventories, natural forest, mitigation, plantations.

^a Doctor e ingeniero forestal, docente e investigador en la Escuela de Ciencias Ambientales e Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica, wfonseca@una.cr



Introducción

El cambio climático ocasionado por el aumento en la concentración de los gases de efecto invernadero en la atmósfera se ha reconocido como una amenaza para la humanidad. Los bosques influyen en el ciclo natural del carbono en la atmósfera porque capturan el carbono mediante la fotosíntesis y lo almacenan con rapidez convirtiéndolo en biomasa, al mismo tiempo liberan carbono durante la respiración (en forma de dióxido de carbono, CO₂) y durante la descomposición de plantas (Angelsen & Wunder, 2003; Backeus, Wikstrom & Lamas, 2005; Basu, 2009; Hemery, 2008; Le Quéré et al., 2012; Pielke, 2005). Además, exportan materia orgánica hacia las capas freáticas profundas o hacia los ecosistemas oceánicos (Food and Agriculture Organization [FAO], 2002; Percy, Jarndl, May & Lavigne, 2003). También se ha reconocido la importante labor en la regulación de ciclos vitales como el ciclo de nutrientes y ciclo del agua (Brown, 1997; Dauber, Terán & Guzmán, 2008; Orrego & del Valle, 2001) y otros beneficios (control de erosión, belleza escénica, alimento, fármacos, etc.).

La biomasa es la materia orgánica acumulada por un ecosistema a través del tiempo (Eamus, McGuinness & Burrows, 2000) y está compuesta por el peso de la materia orgánica aérea y subterránea (Schlegel, Gayoso & Guerra, 2000). Cuantificarla permite determinar la cantidad de nutrientes en diferentes partes de las plantas y estratos de la vegetación y comparar diferentes especies o vegetación, o comparar especies y tipos de vegetación similares en diferentes sitios. Cuantificar la biomasa y el crecimiento de la vegetación es esencial para estimar la fijación de carbono, un tema actualmente relevante por sus implicaciones en relación con el cambio climático (Begon, Harper & Townsend, 1996; Boudowski, 1999; Brown, Sathaye, Cannell & Kauppi, 1996; Ciesla, 1996; Dixon, 1995; Dixon, Schroeder & Winjum, 1991; Malhi & Grace, 2000; Márquez, 1997; Snowdon et al., 2001).

Los bosques reaccionan con rapidez ante las actividades humanas de extracción de la madera, la destrucción del bosque y la ordenación forestal para obtener un crecimiento neto. Según Lugo y Brown (s. f.) las personas que creen que los bosques tropicales son fuente de carbono justifican que el incremento de la deforestación reduce el almacenamiento del carbono y aumenta la cantidad de CO₂ que pasa a la atmósfera. La tesis contraria sostiene que los ecosistemas forestales tropicales son sumideros de carbono y hacen hincapié en el rápido ritmo de sucesión y el elevado consumo neto de CO₂. Al respecto, Schlegel et al. (2000) mencionan que la capacidad de los bosques para almacenar carbono depende de la composición florística, la edad y la densidad de la población y, según FAO (2002), para producir dos metros cúbicos de madera, un bosque atrapa alrededor de una tonelada de carbono del aire, pero al destruirse se libera al año alrededor de una cuarta parte de todos los gases que producen el efecto de invernadero, cerca de 6 000 millones de toneladas de CO₂.

A pesar de la reconocida capacidad de los ecosistemas forestales (Bonan, 2008; González et al., 2008; Hemery, 2008; Newell & Vos, 2012; Righelato & Spracklen, 2007; United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2006; Van Deusen, 2010) –principalmente los bosques tropicales– (Newell & Vos, 2012; International Tropical Timber Organization [ITTO], 2015; Van Deusen, 2010) para mitigar el cambio climático, la exclusión de las actividades de manejo dentro de las estrategias de mitigación ha creado un desbalance a nivel sectorial,



en donde el manejo forestal sostenible ha recibido poco o ningún incentivo, disminuyendo las oportunidades de hacer un mejor uso de los recursos forestales y de aprovechar al máximo los beneficios brindados por los bosques (Ellison, Petersson, Lundblad & Wikberg, 2012; Hashimoto, 2008). Afortunadamente el mecanismo REDD+ considera el manejo forestal sostenible como alternativa a la deforestación (Ellison et al., 2012), sin que se comprometa la biodiversidad ni otros servicios ecosistémicos (Edwards, Tobias, Sheil, Meijaard & Laurance, 2014; Merry, Soares-Filho, Nepstad, Amacher & Rodrigues, 2009).

En el mecanismo REDD+ muchos países/propietarios con bosques tienen esperanza para que se reactiven los mercados de carbono, como es el caso de Costa Rica, en donde se viene desarrollando un mercado nacional voluntario (FONAFIFO, 2015), desde la política nacional de la carbono neutralidad (Costa Rica, 2009; Kowollik, 2014). A pesar de múltiples esfuerzos para generar información con el fin de determinar el verdadero aporte de los bosques al cambio climático, se reconoce la necesidad de más investigación para llenar vacíos de información (UNFCCC 2011), de estudios más exactos y precisos (Clark & Kellner, 2012; Gibbs, Brown, Niles & Foley, 2007), de formación de capacidades (Neeff, Eichler, Deecke & Fehse, 2007; Salinas & Hernández, 2008) y del establecimiento de sistemas de monitoreo, reporte y verificación que garanticen transparencia en los mercados de carbono (UNFCCC, 2011).

2. El inventario para el monitoreo de biomasa

El carbono en los ecosistemas se encuentra en cuatro componentes o compartimentos: biomasa sobre el suelo, necromasa (leñosa y hojarasca), sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo (Nadler, Meza, Torres & Jara, 2001; Orrego & del Valle, 2001).

El diseño de muestreo, la intensidad o tamaño la muestra, y el tamaño de las parcelas está en función de los objetivos, de la precisión requerida y de los recursos disponibles, además de la cantidad carbono almacenado. Para definir el tamaño de la parcela también debe considerarse la densidad arbórea. Al respecto, MacDicken (1997) da algunas recomendaciones (**Cuadro 1**).

En otros trabajos de investigación se han utilizado tamaños de parcela muy variados, que van desde 100 a 1 225 m² en bosque natural para biomasa leñosa (Acosta, Etchevers, Monreal, Quednow & Hidalgo, 2001a; Fonseca, Alice & Rey-Benayas, 2011b; Fragoso, 2003; Herrera, del Valle & Alonso, 2001; Nadler et al., 2001; Orrego & Del Valle, 2001; Schlegel, 2001) y de 64 a 625 m² en plantaciones (Fonseca, Alice & Rey-Benayas, 2009; Fonseca, Alice & Rey-Benayas, 2011a; Gamarra, 2001; Gutiérrez & Lopera, 2001; Lopera & Gutiérrez, 2001).

El componente herbáceo compuesto principalmente por el pasto, hierbas y arbustos (diámetro a la altura del pecho [dap] menor a 2,5 cm) es cuantificado en parcelas de 50 x 50 cm o de 1 x 1 m (Acosta, Quednow, Etchevers & Monreal, 2001b; Fonseca et al., 2011a; Fonseca et al., 2011b, Husch, 2001; Lopera & Gutiérrez, 2001). La hojarasca y mantillo compuesta por los residuos orgánicos (hojas, ramas, frutos, semillas) en la superficie de suelo se evalúa en parcelas de 0,25 m² (Acosta et al., 2001b; Fonseca et al., 2011a; Fonseca et al., 2011b; Herrera et al., 2001).

La frecuencia de las evaluaciones es diferente según el componente de carbono. En los componentes que presentan cambios relativos rápidos en la concentración de carbono, el monitoreo debe hacerse más seguido. En los compartimentos con cambios menores como el



suelo y en áreas no disturbadas el carbono no cambia dramáticamente de año en año, por lo cual el monitoreo puede hacerse más distante, además el muestreo de suelos es costoso. Para eliminar el efecto de la estacionalidad como una fuente de variación de los resultados, los inventarios en las parcelas permanentes deben realizarse en la misma época del año, preferiblemente en el mismo mes (MacDicken, 1997). Las parcelas permanentes de muestreo para evaluar los cambios temporales de biomasa son consideradas como un medio estadísticamente superior.

Cuadro 1. Tamaño de parcelas para inventarios de carbono según MacDicken (1997)

Área por árbol (m ²)	Tamaño de la parcela (m ²)	Aplicación
0 – 15	100	Vegetación muy densa, rodales con gran número de tallos de diámetros pequeños, distribución uniforme de tallos grandes.
15 – 40	250	Vegetación leñosa moderadamente densa.
40 – 70	500	Vegetación leñosa moderadamente esparcida.
70 – 100	666.7	Vegetación leñosa esparcida.
> 100	1 000	Vegetación leñosa muy esparcida.

3. Cuantificación de biomasa

La biomasa es el peso de la materia orgánica aérea y subterránea que existe en un ecosistema forestal (Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO], 2016; Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC], 1996).

Para determinar y monitorear el almacenamiento de carbono orgánico en sistemas forestales y agroforestales, se debe estimar la diferencia de carbono almacenado en suelos y en la biomasa para sitios con el proyecto y sin este sobre un período de tiempo específico; la diferencia en la cantidad de carbono almacenado es el carbono secuestrado por el proyecto. Existen dos técnicas de monitoreo que pueden ser usadas para evaluar el carbono fijado en proyectos forestales (Araujo, Higuchi & de Carvalho, 1999; Brown, 1999; Brown, Gillespie & Lugo, 1989, Brown & Lugo, 1984; Chave et al., 2004; Chave et al., 2014; Cifuentes et al., 2015; Francis, 2000; Jordan & Uhl, 1978; Klinge & Herrera, 1983; Petrokofsky et al., 2012; Saldarriaga, West, Tharp & Uhl, 1988; Schlegel, 2001) y recomendadas por el IPCC (1996):

- Modelaje o método indirecto: se calcula la biomasa del árbol con ecuaciones o modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión entre variables de los árboles, tales como el diámetro a la altura del pecho (*dap*), la altura comercial (h_c) y total (h_t), el crecimiento diamétrico, el área basal y la densidad específica de la madera. También puede estimarse la biomasa a partir del volumen del fuste, y usar luego la densidad básica de la madera para calcular el peso seco y un factor de expansión para calcular el peso total del árbol.
- Método directo o mediciones en campo: Consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa, luego se determina el peso seco.



3.1 Biomasa sobre el suelo

La biomasa viva sobre el suelo está compuesta por los componentes leñosos (árboles en pie) y el sotobosque: pastos, hierbas y estados juveniles, hojarasca o mantillo y la necromasa (Herrera, et al., 2001; Husch, 2001; INTECO, 2016; IPCC, 1996; Nadler et al., 2001; Schlegel, 2001). Sin embargo, la mayoría de estudios se basan en estimaciones de biomasa de los componentes leñosos, además, no toman en cuenta la densidad de la madera, que varía con la edad y la productividad del sitio, lo cual puede generar errores.

Según Brown et al. (1989), las estimaciones de biomasa aérea requieren de un muestreo destructivo o del uso de métodos indirectos, el segundo caso es el más práctico y menos costoso. Para Acosta, Hernández, Velásquez & Etchevers (2002), el uso de ecuaciones alométricas permite una estimación más confiable y directa de la biomasa, ya que en la misma ecuación se contempla la variabilidad presentada por los árboles por edad y competencia, y su crecimiento refleja la productividad del sitio.

3.1.1 Biomasa de los componentes leñosos

Se usan diferentes métodos para estimar la biomasa a partir de mediciones simples:

- a. Aplicación de una ecuación o modelos de regresión específica (ecuaciones alométricas) (**Cuadro 2**) o tablas específicas de biomasa para cada especie a partir de mediciones de árboles individuales (diámetro a la altura del pecho (dap) y altura principalmente), información fácil de obtener y de bajo costo. Los modelos relacionan la biomasa con variables de árboles en pie (dap, altura comercial y total, crecimiento diamétrico, etc.) (Araújo et al., 1999, Brown, 1997; Salas, 2002; Schroeder, Brown, Birdsey & Cieszewski, 1997; Segura & Andrade, 2008). Estos modelos pueden ser construidos usando un mínimo de 30 árboles bien seleccionados (MacDicken, 1997). Se prefiere el uso de modelos que transforman valores de volumen de madera de fuste en biomasa, debido a que la densidad de la madera varía entre árboles de una especie (Acosta et al., 2002, Brown et al., 1989; de Jong, 2001; de Jong et al., citados por Acosta et al., 2001a; Acosta et al., 2001b; Gaillard, Pece & Juárez, 2002; Návar, 2009; MacDicken, 1997). En forma general se prefieren los modelos que tienen como variable regresora el diámetro, porque es muy simple de medir y se obtiene en la mayoría de estudios donde se colecta información para el manejo de plantaciones o bosque natural, esto es una ventaja adicional ya que permite estimar la biomasa a partir de una sola variable (Fonseca et al., 2009). Algunos modelos se presentan en los **Cuadros 2 y 3**.
- b. Aplicación de una ecuación de regresión genérica al diámetro o a otras medidas de los árboles (**Cuadro 2**). Existen modelos generales para estimar el contenido de biomasa aérea en inventarios forestales (Brown et al., 1989, Schroeder et al., 1997), su uso se justifica cuando no existen modelos específicos para zonas o condiciones particulares o cuando varias especies presentan un patrón morfológico de crecimiento similar (Acosta et al., 2002).



- c. Calcular el volumen del fuste (con ecuaciones de volumen, con tablas de rendimiento, etc.) y multiplicarlo por la gravedad específica para pasar a biomasa, posteriormente se aplica un factor de expansión para estimar biomasa entera del árbol (Acosta et al., 2001b; Acosta et al., 2002; de Jong 2001; Fonseca et al., 2011a; Fonseca et al., 2011b; INTECO, 2016). El valor de gravedad específica de cada especie puede encontrarse en la bibliografía o calculado por análisis de laboratorio.
- d. Uso de la técnica del árbol promedio (MacDicken, 1997). Se parte del supuesto de que el árbol de tamaño promedio tiene una cantidad promedio de biomasa, se considera que el área basal tiende a ser un buen predictor de la biomasa total. Su uso requiere del muestreo destructivo para determinar la biomasa y el peso del árbol es multiplicado por el número de árboles del rodal para obtener un estimado de la biomasa total. Lopera y Gutiérrez (2001) utilizaron el árbol correspondiente al diámetro medio cuadrático (Dg) (árbol de área basal media).

Los primeros tres métodos se denominan indirectos y el cuarto directo (Brown, 1997; Brown et al., 1989, INTECO, 2016; MacDicken, 1997; Schlegel 2001).

Cuadro 2. Modelos específicos para estimar biomasa en plantaciones forestales. *El significado de los acrónimos y sus unidades están en los artículos originales*

Autor	Biomasa	Ecuación	R ²
Sanquetta, Farinha & Eduardo (2008)	<i>Pinus taeda</i>	PVF = $-0,3074 + D^{(2,1289)}$	0,89
		PVR = $162,0559 - 9,2412 * D + 0,2393 * D^2$	0,43
Fonseca & Rojas (2015)	<i>Dendrocalamus latiflorus</i> , <i>Guadua agustifolia</i> y <i>G. aculeata</i>	Bculmos = $13,8618 + 1,85367 * G$	0,8
		Btotal = $29,2136 + 1,78608 * G$	0,76
Fonseca, Ruíz, Rojas y Alice (2013)	<i>Alnus acuminata</i>	Bárbol = $\exp(-2,62104 + 2,51636 * \ln(\text{dap}))$	0,98
		Ca = $\exp(-0,145192 + 1,28892 * \ln(G))$	0,99
Fonseca et al. (2009)	<i>Vochysia guatemalensis</i>	Bt = $\exp(-1,44742 + 1,3308 * d^{0,5})$	0,98
	<i>Hieronyma alchorneoides</i>	Bt = $\exp(-2,12607 + 1,69594 * d^{0,5})$	0,98
Montero & Kanninen (2002)	<i>Terminalia amazonia</i>	BAT = $\exp(-1,648 + 2,392 * \ln(\text{dap}))$	0,99
		B fuste = $\exp(-1,602 + 2,99 * \ln(\text{dap}))$	0,99
Pérez & Kanninen (2003)	<i>Tectona grandis</i>	Bt = $-0,815 + 2,382 * \log_{10} \text{dap}$	0,98



Cuadro 3. Modelos para estimar la biomasa en bosques naturales. *El significado de los acrónimos y sus unidades están en los artículos originales*

Autor	Biomasa	Ecuación	R ²
Brown et al. (1989)	Bosque seco (< 1500 mm)	$B = 34,4703 - 8,0671 d + 0,6589 d^2$	0,67
	Bosque húmedo (150 – 4000 mm)	$B = 38,4908 - 11,7883 d + 1,1926 d^2$	0,78
		$B = \exp [-3,1141 + 0,9719 \ln(d^{2h})]$	0,97
		$B = \exp [-2,4090 + 0,9522 \ln(d^2h)]$	0,99
Segura, Kanninen, Alfaro & Campos (2000)	Bosque primario	$\ln(Bt) = 0,70 + 0,81 * \ln (Bfuste)$	0,92
		$\ln(Bt) = 0,94 + 0,12 * (Vfuste)$	0,90
		$\ln(Bt) = -6,93 + 1,87 * \ln(d) + 0,005 * \ln(d) * ht$	0,88
Lagos (2003)	Latizal alto y bajo	$Bt = 2,0367 - 1,9034 (d) + 0,4919$	0,86
	Latizal alto y bajo	$LBt = 1,3957 + 0,5509 (d) - 0,0274 (d)^2$	0,92
	Latizal alto y bajo	$Bt = 0,8435 + 0,0314 (d)^2 * H$	0,82
Aguilar (2001)	Fustales	$\text{Log}Bt = -3,89391 + 2,40215 * \text{Log}d$	0,96
	Latizales	$\text{Log}Bt = -1,58763 + 1,06235 * d$	0,95
Fonseca et al. (2009)	Bosque secundario	$\text{Log}(Bt) = -1,80246 + 2,28927 * \ln(d)$	0,96
Fonseca (2016)	Bosque húmedo del pacífico central	$B_{total} = \text{Exp} (-1,6203 + 2,30583 * \ln (Dap))$	0,97
		$C_{total} = \text{Exp} (-2,45614 + 2,30938 * \ln (Dap))$	0,97
	Bosque del pacífico central.	$B_{otal} = 1 / (0,000450933 + 0,108525 / G)$	0,93
	Biomasa y carbono incluye árboles, vegetación herbácea y necromasa	$C_{total} = 1 / (0,000411285 + 0,181226 / G)$	0,94

3.1.2 Muestro de componentes leñosos, herbáceos y de necromasa: procedimiento de campo y laboratorio para estimación de biomasa

La determinación de la biomasa por métodos indirectos requiere de la medición de variables como el diámetro (dap) y altura total de toda la vegetación leñosa, según el diámetro mínimo fijado para el inventario (MacDicken, 1997).

El método directo o destructivo requiere el muestreo de árboles preferiblemente de área basal media (árbol de diámetro cuadrático medio-Dg), ya que es una variable de fácil estimación y presenta una alta correlación con el árbol de volumen medio del rodal (Finger, 1992; Schneider 1993, citados por Sanqueta, 2008). Después de cortado el árbol se separan las diversas partes



(fuste, ramas vivas, ramas muertas, hojas- acículas, raíz), cada componente se pesa en el campo. En el caso de que parte del fuste y las ramas gruesas sean usadas para obtener productos en procesos de aserrío, se obtiene su volumen y la biomasa seca se calcula extrayendo discos o muestras de madera, o bien se usa la densidad específica (Acosta et al., 2001b; Acosta et al., 2002; De Jong 2001; Fonseca et al., 2011a; Fonseca et al., 2011b; Gaillard et al., 2002; Herrera et al., 2001; Lopera & Gutiérrez, 2001; Nadler et al., 2001; Nívar, González & Graciano, 2001; Schlegel et al., 2000).

En árboles de gran tamaño y copa muy desarrolla, para disminuir el esfuerzo de muestreo Gregoire, Valentine & Furnival (1995) proponen el método Randomized Branch Sampling o muestreo aleatorio de sendas o caminos y el Importance Sampling o importancia de muestreo desarrollado por Valentine, Tritton & Furnival (1884), en ambos casos se selecciona un camino de muestreo desde la base del árbol hasta la terminación de la copa. El primer segmento es el tronco que termina en el primer verticilo, luego se escoge aleatoriamente una rama que sería el segundo segmento y se continúa hacia la siguiente bifurcación hasta llegar al verticilo terminal.

El componente herbáceo compuesto principalmente por el pasto, hierbas y arbustos (dap menor a 2,5 cm), disponible en la unidad de muestreo se corta a nivel del suelo, además se cosecha la necromasa fina (hojas, ramas, frutos, semillas) y gruesa (material leñoso con diámetro >2 cm) (Acosta et al., 2001b; Herrera et al., 2001; Husch, 2001; Lopera & Gutiérrez, 2001).

Según MacDicken (1997), la biomasa de raíces representa entre un 10 y 40 % de la biomasa total. La biomasa de raíces puede estimarse por dos procedimientos: medición directa y uso de relaciones (modelos) de biomasa de raíces obtenidas en la bibliografía. Con el primer método se invierte mucho tiempo y con un nivel de precisión moderado, debido a la amplia variabilidad en distribución de las raíces en el suelo.

El uso de modelos o relaciones de biomasa de raíces puede ser de utilidad usando una relación de biomasa de raíces - biomasa aérea. En bosques tropicales la relación biomasa de raíces: biomasa aérea varía de 0,03 a 0,49, aunque para ofrecer resultados conservativos se podría emplear un valor de 0,10 a 0,15 (MacDicken, 1997). En otros estudios, las raíces han representado el 10% de la biomasa aérea en sitios húmedos y cerca del 30% en lugares semiáridos (Dixon, 1995). Aunque la recomendación de MacDicken (1997) es compartida y se reconoce el grado de dificultad y alto costo que la cuantificación de raíces conlleva, es oportuno realizar estudios locales que permitan una evaluación más precisa, ya que la diferencia entre utilizar valores generales y cifras de trabajos locales es bastante marcada.

Las raíces se clasifican por su diámetro en: muy finas (<0,5 mm), finas (0,5-2,0 mm), pequeñas (2,0-5,0 mm), medias (5,0-10 mm), gruesas (10-20 mm), y muy gruesas (>20 mm) (Schlönvoigt, Chesney, Schaller & Van Canten, 2000). Según MacDicken (1997), en la mayoría de los protocolos de monitoreo de fijación de carbono se consideran las raíces finas como las de diámetro menor a 2,0 mm y son las más estudiadas por su dinámica. La cuantificación de la biomasa de raíces finas tiene el inconveniente de su corta vida, mueren rápidamente y el carbono almacenado en ellas se libera rápidamente, y como tal, no es un carbono duradero que es lo que interesa a los mercados de este servicio ambiental. La raíz gruesa o de anclaje por ser leñosa representa un carbono más duradero y una cantidad muy significativa por área, sin embargo, la dificultad y alto costo que representa su cuantificación han hecho que pocas investigaciones se interesen por desarrollar métricas para este componente (Schlegel et al., 2001).



Diversos estudios se han desarrollado utilizando la clasificación de raíces antes citada o con pequeñas modificaciones. Una vez separadas las raíces se secan a 72 °C durante 48 horas y se pesan para determinar el contenido de humedad (Acosta et al., 2001a). Para el muestreo de raíces se utiliza un barreno de acero con el cual se obtienen las muestras de suelo a diferentes profundidades en el perfil del suelo. En ecosistemas tropicales generalmente se trabaja hasta 40 cm que es donde existe la mayor dinámica (Acosta et al., 2001a). Orrego & Del Valle (2001) dan valores de 99,2 t/ha y 93,6 t/ha en bosques primarios y secundarios, respectivamente, a 30 cm de profundidad.

Cuando se colecta la muestra de biomasa viva o la necromasa debe tenerse el cuidado de no contaminarla con suelo (principalmente con la necromasa fina), ya que las fracciones de carbono en biomasa y en suelo son muy diferentes.

Todo la biomasa viva o muerta se pesa en el campo y se toma una muestra de aproximadamente 500 g y se lleva al laboratorio para determinar el contenido de materia seca a 60-75 °C durante 72 horas. Esta muestra se tritura a 250 micras y en una submuestra se determina la proporción de carbono (Acosta et al., 2001b; Herrera et al., 2001; Husch, 2001; Lopera & Gutiérrez, 2001).

4. Estimación de la cantidad de carbono en la biomasa

Para estimar el carbono almacenado por el ecosistema o por parte de él, es necesario estimar la biomasa utilizando cualquiera de los métodos descritos anteriormente, el carbono almacenado puede estimarse de diferentes formas:

- Mediante el procedimiento de combustión seca, a partir de la biomasa seca (Acosta, et al., 2001b).
- Usando el método de Walker y Black (Bremner y Mulvaney, 1982).
- Utilizando la fracción de carbono a partir de biomasa seca. Varios autores (Brown & Lugo, 1984; Gaillard et al., 2002; IPCC, 1996) recomiendan utilizar para diversos tipos de bosques naturales, bosques secundarios y plantaciones forestales, entre 0,45 y 0,5 como fracción de carbono en caso de no existir datos disponibles.

5. Factores de reducción y expansión de biomasa

El factor de reducción (F_r), según Loguercio & Defoseé (2001), se utiliza cuando los árboles vivos están afectados por hongos que degradan la madera provocando pudriciones, con una densidad diferente a la madera sana. Relaciona la biomasa neta de fustes y ramas (B_{nfr}) con la biomasa bruta de fustes y ramas (B_{nfr}) y su tendencia es a disminuir conforme aumenta el diámetro, así mismo reportan un valor promedio de 0,94 para árboles de *Nothofagus pumilio* en Argentina.

El factor de expansión de biomasa (FEB) es el cociente entre la biomasa aérea total y la biomasa del fuste. Se utiliza cuando no existe la información detallada de un inventario forestal con los parámetros de cada árbol. La biomasa total se obtiene al multiplicar este cociente por el volumen del fuste y luego por la densidad específica promedio de las especies (Loguercio & Defoseé, 2001; Nívar, 2009). Loguercio & Defoseé (2001) determinación que el factor de expansión disminuye al aumentar el diámetro, gráficamente muestra un comportamiento en forma de *J invertida*. IPCC (1996) recomienda un FEB de 1,6 y para Dixon (1995) la relación más comúnmente empleada es 1,6, otros valores se observan en el Cuadro 4.



Cuadro 4. Factores de expansión de biomasa en el trópico

Especie	País	Factor de expansión	Autoría
<i>Nothofagus pumilio</i>	Argentina	1,75	Loguercio & Defoseé (2001)
<i>Quercus costarricensis</i>	Costa Rica	1,7	Segura (1997)
<i>Árboles de bosque natural</i>	Costa Rica	1,6	Segura, Kanninen, Alfaro & Campos (2000)
Árboles de bosque sub-húmedo estacional	Santa Cruz, Bolivia	2,5	Soliz (1998)
Bosques siempre verde	Chile	entre 1,89 y 2,83	Schlegel (2001)
Bosque secundario	Costa Rica	1,44	Fonseca (2009)
<i>Hieronyma alchorneoides</i>	Costa Rica	1,57	Fonseca (2009)
<i>Vochysia guatemalensis</i>	Costa Rica	1,56	Fonseca (2009)
<i>Pinus pseudostrubus</i>	México	1,37	Domínguez et al. (2009)
<i>Cordia alliodora</i>	Ecuador	1,72	Solano et al. (2014)
<i>Eriotheca ruizii</i>		1,41	
<i>Tabebuia chrysantha</i>		1,75	

En Costa Rica, para determinar el carbono almacenado y para hacer proyecciones, investigaciones de la FAO (2003) utilizaron los siguientes factores de expansión:

- *El factor de expansión de copa (Fcopa)*. Al no existir estudios específicos para cada especie sobre el volumen de ramas y follaje, se utilizó un valor genérico de 1,5 para plantaciones con especies latifoliadas.
- *El factor de expansión de raíces (Fraíces)*. Un valor 1,5 y 1,7 para plantaciones de pinos y eucaliptos respectivamente. En Costa Rica se utilizó 1,5.
- *Contenido de carbono en sotobosque (Fsobosque)*. El valor recomendado fue de 5 toneladas de carbono por hectárea en plantaciones forestales.
- *Contenido de carbono en mantillo (Fmantillo)*. Valor recomendado de 15 t/ha en plantaciones forestales.

6. Muestro de suelos y determinación del carbono edáfico

El suelo es considerado como un gran almacén de carbono orgánico e inorgánico y representa en muchos casos, el principal sumidero (IPCC, 2007; Petrokofsky et al., 2012).



Acosta et al. (2001a) justifican el estudio de carbono en el suelo y mencionan que el 75 % del C de los ecosistemas se encuentra en el suelo, como biomasa de raíces o en formas estables, como compuestos geoquímicos. Su determinación requiere, necesariamente, de mediciones específicas de sitio ya que las variaciones están influenciadas por condiciones ambientales como la temperatura, humedad, pH, etc. (Petrokofsky et al., 2012).

El carbono edáfico puede ser determinado usando muestras compuestas que representan múltiples parcelas, con lo cual se reducen los costos y se obtienen estimaciones razonables (MacDicken, 1997). La acumulación en el suelo se determina por medio de la densidad aparente, generalmente a una profundidad de 30 cm (en algunos estudios se ha trabajado hasta 105 cm en tramos de 15 cm), ya que el cambio de uso del suelo tiene el mayor efecto en las capas superiores (IPCC, 1996). El muestreo se realiza con un barrero cilíndrico para extraer muestras de suelo para el análisis de carbono, estimar la biomasa radical y calcular la densidad aparente (Acosta et al., 2001a).

Este reservorio puede verse afectado por las actividades de manejo del suelo y no se considera oportuna la evaluación del carbono edáfico por su dificultad y altos costos (Brown et al., 1999; de Jong, Tipper & Montoya, 2000; MacDicken, 1997). Es usual que este reservorio sea excluido de la mayoría de estudios que intentan estimar las emisiones producto del manejo forestal de bosques (Helin, Sokka, Soimakallio, Pingoud & Pajula, 2013). La exclusión se justifica debido a que se impacta un área relativamente pequeña, el impacto tiene una duración corta y que además siempre se mantiene cobertura vegetal en el sitio (Pearson, Brown & Casarim, 2014); adicionalmente, los cambios en este compartimento ocurren a tasas sumamente lentas, lo que dificulta su determinación (Fonseca et al., 2011a; Fonseca et al., 2011b), además de que son afectados por el uso anterior del suelo (Guo & Gifford, 2002).

6. Conclusión

Los países cada vez más preocupados por economías bajas en carbono tienen muchas esperanzas en que los mercados de carbono evolucionen positivamente para poder acceder a recursos económicos, retribuyendo a los sujetos propietarios del bosque por el servicio ambiental. De ser así, el inventario de remociones -en este caso la medición de la biomasa vegetal- debería ser un tópico de mucho dominio por profesionales que se encargan de la planificación, ejecución y la elaboración del informe técnico del inventario, como de las personas encargadas de llevar registros o la contabilidad de carbono a nivel nacional, para las agencias o instancias certificadoras, entre otros.

La bibliografía existente sobre inventarios de biomasa, componentes evaluados y métodos para determinarla es abundante, lo cual genera mucha incertidumbre a la hora de obtener la información y realizar los cálculos para obtener el resultado final: ¿cuánto carbono se tiene almacenado? Ante esta duda, y principalmente cuando la información se requiere para algún proceso de monitoreo, reporte y verificación tendiente a obtener alguna certificación a nivel nacional o internacional, lo aconsejable es consultar con la agencia o institución certificadora sobre los requisitos requeridos, sin correr el riesgo de tener un faltante de información o recopilar más de lo requerido, aumentando así el costo del inventario.



7. Referencias

- Acosta, M., Etchevers, J., Monreal, C., Quednow, K & Hidalgo C. (2001a). Un método para la medición de carbono en los compartimentos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- Acosta, M., Quednow, K., Etchevers, J. & Monreal, C. (2001b). Un método para la medición del carbono almacenado en la parte aérea de sistemas de vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- Acosta, M., Hernández, J., Velásquez, A., & Etchevers, J. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725-736.
- Angelsen, A., & Wunder, S. (2003). Exploring the forest–poverty link: *Key concepts; Issues and research implications*. Indonesia: CIFOR, Occasional paper n° 40. 58 p.
- Araujo, T., Higuchi, N., & de Carvalho, J. (1999). Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest in the state of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 117,43-52. doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00470-8](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00470-8)
- Backeus, S., Wikstrom, P., & Lamas, T. (2005). A model for regional analysis of carbon sequestration and timber production. *Forest Ecology and Management*, 216(1-3), 28-40. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.059>
- Basu, P. (2009). A green investment. If growing forests in India can generate lucrative carbon credits, then why isn't everyone planting trees? News feature. *Nature*, 457(8), 144-146. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.059>
- Begon, M., Harper, J. & Townsend, C.R. (1996). *Ecology: individuals, populations and communities*. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications. doi: <https://doi.org/10.1002/9781444313765>
- Bonan, G.B. (2008). Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(5882), 1444-1449. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Bremner, J. M., & Mulvaney, C. (1982). *Carbon, inorganic nitrogen*. In: Miller, R., Keeney, D. (Eds.), *Methods for Soil Analysis: Chemical and Microbiological Properties*. (2 ed.). Madison, USA: American Society of Agronomy.
- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a primer*. Forestry Paper 134. Rome, Italy: FAO.
- Brown, S., Gillespie, A. & Lugo, A. (1989). Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 35(4), 881-902.
- Brown, S. & Lugo, A. (1984). Biomass of tropical forests. A new estimate based on forest volumes. *Science*, 223, 1290-1293. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1155121>



- Brown, S., Sathaye, M., Cannell, M., & Kauppi, P. (1996). Mitigation of carbon emission to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review*, 75(1), 80-91.
- Ciesla, W. M. (1996). *Cambio climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto*. Estudio FAO Montes N.º 126. Roma, Italia: FAO.
- Cifuentes, M., Henry, M., Méchain, M., López, O., Wayson, C., Michel, J. M., ... & Westfal, J. (2015). Overcoming obstacles to sharing data on tree allometric equations. *Annals of Forest Science*. doi: <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0467-8>
- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernández, A., Lao, S., & Pérez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 359(1443), *Tropical Forests and Global Atmospheric Change*, 409-420. doi: <http://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>
- Chave, J., Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M., Delitti, W., ... Vieilledent, G. (2014). Improved pantropical allometric models to estimate the above ground biomass of tropical forests. *Global Change Biology* 20, 3177–319. doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Clark, D. & Kellner, J. (2012). Tropical forest biomass estimation and the fallacy of misplaced concreteness. *Journal of Vegetation Science*, 23,1191-1196. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2012.01471.x>
- Costa Rica. (2009). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. San José, Costa Rica: Editorial Calderón y Alvarado.
- Dauber, E., Terán, J. & Guzmán, R. (2008). Estimaciones de biomasa y carbono en bosques naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1),1-10.
- de Jong, B. (2001, octubre). Fuentes y niveles de error en las estimaciones del potencial de captura de carbono. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- de Jong, B., Tipper, R & Montoya, G. (2000). An economic analysis of the potencial for carbon sequestration by forest: evidence from southern México. *Ecological Economics*, 33,313-327. doi: [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00162-7)
- del Valle, J. 2001. Crecimiento en biomasa y acumulación de carbono en los saules del delta del Río Patía. En G. Vásquez (Ed.), *Jubileo de la ingeniería forestal: 50 años de academia y profesión*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Departamento de Ciencias Forestales.
- Dixon, R. (1995). Agroforestry systems: sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry systems*, 31, 99-116. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00711719>
- Dixon, K., Schroeder, P., & Winjum, J.K. (1991). *Assessment of promising forest management practices and technologies for enhancing the conservation and sequestration of atmospheric carbon and their costs at the site level*. Corvallis, Or., USA: EPA.



- Domínguez, G., Aguirre, O., Jiménez, J., Rodríguez, R., & Díaz, J. (2009). Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 59-64.
- Eamus, D., McGuinness, K., & Burrows, W. (2000). *Review of allometric relationships for estimating woody biomass for Queensland, the northern territory and western Australia. National Carbon accounting system*. Technical report n.º 5. Australian: Australian Greenhouse Office.
- Edwards, D. P., Tobias, J. A., Sheil, D., Meijaard, E., & Laurance, W. F. (2014). Maintaining ecosystem function and services in logged tropical forests. *Trends in Ecology and Evolution*, 29(9), 511-520. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.07.003>
- Ellison, D., Petersson, H., Lundblad, M., & Wikberg, P. (2012). The incentive gap: LULUCF and the Kyoto mechanism before and after Durban. *GCB Bioenergy*, 5, 599-622. Doi: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12034>
- FAO. (2002). *Protocolo de Kyoto: Importante instrumento para el desarrollo*. Roma, Italia: FAO.
- FAO. (2003). *Serie centroamericana de bosques y cambio climático. Costa Rica frente al cambio climático*. Roma, Italia: FAO.
- Fonseca, W. (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). Proyecto Cooperación Internacional entre la Universidad Nacional y la Agencia de Cooperación Alemana (GIZ)*. Heredia, Costa Rica: Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional.
- Fonseca, W. 2009. *Restauración forestal y almacenamiento de carbono en el trópico húmedo (Zona Caribe de Costa Rica)*. (Disertación doctoral inédita). Universidad de Alcalá, España. 190 p.
- Fonseca, W., Alice, F., & Rey-Benayas, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36-47. doi: <https://doi.org/10.4067/s0717-92002009000100006>
- Fonseca, W., Alice, F., & Rey-Benayas, J. M. (2011a). Carbon accumulation in aboveground and below-ground biomass and soil of different age native forest plantations in the humid tropical lowlands of Costa Rica. *New Forests*, 43(2), 197-211. doi: <https://doi.org/10.1007/s11056-011-9273-9>
- Fonseca, W., Alice, F. & Rey-Benayas, J. M. (2011b). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262, 1400-1408. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.06.036>
- Fonseca, W. & Rojas, M. (2015). Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica. *Ambiente y Desarrollo*, 20(38), 85-98.
- Fonseca, G., Ruíz, L., Rojas, M. & Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46(2), 37-50. doi: <https://doi.org/10.15359/rca.46-2.4>



- Francis, J.K. (2000). Estimating biomass and carbon content of saplings in Puerto Rican secondary forests. *Caribbean Journal of Science*, 36(3-4), 346-350.
- Fragoso, P. (2003). *Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio "Cerro Grande" municipio de Tancítaro Michoacán México*. Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Agrobiología.
- Gaillard, C., Pece, M. & Juárez, M. (2002). Biomasa aérea de quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco*) en dos localidades del Parque Chaqueño Seco. *Revista Ciencias Ambientales – Quebracho* 9,116-127.
- Gamarra, J. (2001, octubre). Estimación del contenido de carbono en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill, en Junin, Perú. Ponencia presentada en el, Valdivia, Chile. *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*
- Gibbs, H. K., Brown, S., Niles, J. & Foley J. A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2, 045023. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>
- González, P., Hassan, R., Lakada, P., Mc Callum, I., Nilson, S., Pulhin, J., van Rosenburg, B., & Scholes, B. (2008). Forest and woodland systems: Chapter 21(pp. 587-614). Washington, USA: TEEP for Agriculture & Food Scientific Foundation Report.
- Gregoire, T. G., Valentine, H. T., & Furnival, G. M. (1995). Sampling methods to estimate foliage and other characteristics of individual trees. *Ecology*, 76(4), 1181-1194. doi: <https://doi.org/10.2307/1940925>
- Guo, L. B., & Gifford, L. M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: A Meta Analysis. *Global Change Biology*, 8(4), 345-360. doi: <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- Gutiérrez, V. H. & Lopera, J. (2001, octubre). Metodología para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- Hashimoto, S. (2008). Different accounting approaches to harvested wood products in national greenhouse gas inventories: their incentives to achievement of major policy goals. *Environmental Science & Policy*, 11, 756-771. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2008.08.002>
- Helin, T., Sokka, L., Soimakallio, S., Pingoud, K. & Pajula, T. (2013). Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment? a review. *GCB Bioenergy*, 5,475-486. doi: <https://doi.org/10.1111/gcbb.12016>
- Hemery, G.E. (2008). Forest management and silvicultural responses to projected climate change impacts on European broadleaved trees and forests. *International Forestry Review*, 10(4), 591-607. doi: <https://doi.org/10.1505/ifor.10.4.591>



- Herrera, M. A., del Valle, J. & Alonso, S. (2001, octubre). Biomasa de la vegetación arbórea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- Husch, B. (2001, octubre). *Estimación del contenido de carbono en los bosques*. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica. (2016). *Metodología para la cuantificación y reporte de remociones de gases de efecto invernadero producto de actividades forestales INTE/DN03:2016*. San José, Costa Rica: INTECO.
- Intergovernmental Panel of Climate Change. (1996). *Report of the twelfth session of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories*. México: IPCC.
- Intergovernmental Panel of Climate Change. (2007a). *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, LA Meyer (Eds.)]. USA: Cambridge University Press.
- International Tropical Timber Organization. (2015). *Voluntary guidelines for the sustainable management of natural tropical forests*. Yokohama, Japan : ITTO Policy Development Series n.º 20.
- Jordan, C. F., & Uhl, C. (1978). Biomasa of a “tierra firme” forest of the Amazon Basin. *Oecologia Plantarum*, 13(4), 387-400.
- Kowollik, M. (2014). Costa Rica carbono neutral: Un país pequeño con metas grandes. Friedrich Ebert Stiftung (FES) América Central. *Perspectivas* (8).
- Klinge, H., & Herrera, R. (1983). Phytomass structure of natural plant communities on spodosols in Southern Venezuela: The tall Amazon Caatinga Forest. *Vegetatio*, 53, 65-64. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00043025>
- Le Quéré, C., Andres, R. J., Boden, T., Conway, T., Houghton, R. A., House, J. I. ... Zeng, N. (2012). The global carbon budget 1959-2011. *Earth System Science Data Discussions*, 5, 1107-1157. doi: <https://doi.org/10.5194/essdd-5-1107-2012>
- Lopera, G., & Gutiérrez, V. H. (2001, octubre). Flujo de carbono y respuesta a diferentes estrategias de manejo en plantaciones forestales de *Pinus patula*. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- Lugo, A., & Brown, S. (s. f.). Los bosques tropicales. ¿Fuentes o sumideros de carbono atmosférico? Roma, Italia: FAO. 6 p.



- Loguercio, G. & Defossé, G. (2001, octubre). Ecuaciones de biomasa aérea, factores de expansión y de reducción de la lenga *Nothofagus pumilio* (Poepf. Et Endl) Krasser, en el So del Chubut, Argentina. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- MacDicken, K. (1997). *A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects*. Forest Carbon Monitoring Program. Winrock International Institute for Agricultural Development (WRI).
- Malhi, Y., & Grace, J. (2000). Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology and Evolution*, 15(8), 332-336. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(00\)01906-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(00)01906-6)
- Márquez, L. (1997). *Validación de campo de los métodos del Instituto Winrock para el establecimiento de parcelas permanentes de muestreo para cuantificar carbono en sistemas agroforestales*. Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala.
- Merry, F., Soares-Filho, B., Nepstad, D., Amacher, G. & Rodrigues, H. (2009). Balancing Conservation and Economic Sustainability: The Future of the Amazon Timber Industry. *Environmental Management*, 44,395-407. doi: <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9337-1>
- Montero, M., & Kanninen, M. (2002). Biomasa y carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en la zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 39-40,50-55.
- Nadler, C., Meza, A., Torres, R., & Jara, M. A. (2001, octubre). Medición del carbono almacenado en los bosques de la reserva nacional Malleco. IX Región, Chile. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- Návar, J. J. (2009). Allometric equations and expansion factors for tropical dry trees of eastern Sinaloa, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10, 45-52.
- Návar, J., González, N., & Graciano, J. (2001, octubre). Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.
- Neeff, T., Eichler, L., Deecke, I. & Fehse, J. (2007). *Actualización sobre los mercados para compensaciones forestales para la mitigación del cambio climático*. Serie técnica, Manual técnico - CATIE; n.º 77. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Newell, J. P. & Vos, R. O. (2012). Accounting for forest carbon pool dynamics in product carbon footprints: Challenges and opportunities. *Environmental Impact Assessment Review*, 37, 23-36. doi:10.1016/j.eiar.2012.03.005 doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.03.005>
- Orrego, S. & del Valle, J. I. (2001, octubre). Existencias y tasas de crecimiento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios y secundarios de Colombia. Ponencia presentada en el *Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*, Valdivia, Chile.



- Pearson, T. R., Brown, S., & Casarim, F. M. (2014). Carbon Emissions from tropical forest degradation caused by logging. *Environmental Research Letters*, 9, 034017. doi: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034017>
- Percy, K. E., Jarndl, R., May, J. P., & Lavigne, M. (2003). *El papel de los bosques en ciclo, la captura y el almacenamiento de carbono*. Boletín N.º 1: Bosques y el ciclo de carbono e nivel mundial: Fuentes y sumideros. Viena, Austria: IUFRO.
- Pérez, D. & Kanninen, M. (2003). Aboveground biomass of *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Journal of Tropical Forest Science*, 15(1), 199-213.
- Petrokofsky, G., Kanamaru, H., Achard, F., Goetz, S., Joosten, H., Holmgren, P., ... Wattenbach, M. (2012). Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 1(6). Doi: <http://doi.org/10.1186/2047-2382-1-6>
- Pielke, R. A. (2005). Land Use and climate change. *Science*, 310(5754), 1625-1626. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1120529>
- Righelato, R. & Spracklen, D. (2007). Carbon Mitigation by Biofuels or by Saving and Restoring Forests? *Science*, 317(5840), 902-902. doi: <https://doi.org/10.1126/science.1141361>
- Sanquetta, C. R., Farinha, L. & Eduardo, J. (2008). Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea en plantaciones de *Pinus taeda* en el sur del Estado de Paraná, Brasil. Universidad Federal del Paraná, Departamento de Ciencias Forestales. *Revista Patagonia Forestal*.
- Salas, C. (2002). Ajuste y validación de ecuaciones de volumen para un relicto del bosque de Roble-Lauriel-Lingue. *Bosque*, 23(2), 81-92. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002002000200009>
- Saldarriaga, J. G., West, D. C., Tharp, M. L., & Uhl, C. (1988). Long-term chronosequence of forest succession the upper Río Negro of Colombia and Venezuela. *Journal of Ecology*, 76, 938-958. doi: <https://doi.org/10.2307/2260625>
- Salinas, Z., & Hernández, P. (Eds.). (2008). *Guía para el diseño de Proyectos MDL forestales y de bioenergía*. Serie Técnica, Manual Técnico-CATIE; n.º 83. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Schlegel, B. (2001, octubre). *Estimaciones de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde*. Ponencia presentada en el Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Valdivia, Chile.
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2000). *Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial: Manual de procedimientos: Muestreos de biomasa forestal*. Valdivia, Chile, Universidad Austral de Chile.
- Schroeder, P., Brown, S., Birdsey, M., & Cieszewski, C. (1997). Biomass estimations for temperature broadleaf forests of the United States using inventory data. *Forest Science*, 43(3), 424-434.



- Schlönvoigt, A., Chesney, P., Schaller, M., & Van Canten, R. (2000). Estudio ecológicos de raíces en sistemas agroforestales: Experiencias metodológicas en el CATIE. Módulo de capacitación forestal. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Segura, M. (1997). *Almacenamiento y fijación de carbono en Quercus costarricensis, en un bosque de altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica* (Tesis de licenciatura inédita). Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, Escuela de Ciencias Ambientales.
- Segura, M., Kanninen, M., Alfaro, A., & Campos, J. J. (2000). Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 30, 23-28.
- Segura, M., & Andrade, H. (2008). ¿Cómo hacerlo? ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería de las Américas*, 46,89-96.
- Snowdon, P., Raison, J., Keith, H., Montagu, K., Bi, H., Ritson, P., ... Eamus, D. (2001). *Protocol for sampling tree and stand biomass*. Australian: Australian Greenhouse Office, National Carbon Accounting System, Technical report n.º 3.
- Solano, D., Eras, V., & Cueva, K. (2014). Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador. *Revista Cedamaz*, 4(1), 32-44.
- Soliz, B. (1998). *Valoración económica del almacenamiento y fijación de carbono en un bosque subhúmedo estacional de Santa Cruz, Bolivia* (Tesis de maestría inédita). Turrialba, Costa Rica. CATIE.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2006). *Handbook*. Bonn, Germany: Climate Change Secretariat. Halesworth, UK: UNFCCC.
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2011). Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010 Addendum Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its sixteenth session: UNFCCC-FCCC/CP. Recuperado de: http://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a_01.pdf
- Valentine, H. T., Tritton, L. M., & Furnival, G. M. (1984). Subsampling trees for biomass, volume, or mineral content. *Forest Science*, 30,673-681.
- van Deusen, P. (2010). Carbon sequestration potential of forest land: Management for products and bioenergy versus preservation. *Biomass and Bioenergy*, 34, 1687-1694. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.03.007>