

ESTIMACIÓN DE LAS RESERVAS Y PÉRDIDAS DE CARBONO POR DEFORESTACIÓN EN LOS BOSQUES DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, COLOMBIA

ESTIMATION OF CARBON STOCKS AND LOSS BY DEFORESTATION IN THE FORESTS OF ANTIOQUIA, COLOMBIA

Adriana Yepes-Quintero^{1, 6}, Álvaro J. Duque-Montoya^{1, 2, 3, 7}, Diego Navarrete-Encinales^{1, 8}, Juan Phillips-Bernal^{1, 9}, Edersson Cabrera-Montenegro^{1, 10}, Adriana Corrales-Osorio^{3, 11}, Esteban Álvarez-Dávila^{1, 4, 12}, Gustavo Galindo-García^{1, 13}, María C. García-Dávila^{1, 14}, Álvaro Idárraga^{5, 15}, Diana Vargas-Galvis^{1, 16}

Resumen

Los bosques tropicales almacenan grandes cantidades de carbono en su biomasa, y por ello juegan un papel determinante en el ciclo global de este elemento. Las variables biofísicas determinan la capacidad de almacenamiento de los bosques como reservorios de carbono. No obstante en los últimos años, la deforestación tropical ha hecho que estos ecosistemas se conviertan en fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. El presente estudio quiso evaluar la distribución de la biomasa aérea (**BA**) y carbono en relación con la variación altitudinal de los bosques naturales del departamento de Antioquia (Colombia), así como las pérdidas potenciales asociadas con la deforestación, durante el periodo 2000-2007. Para ello se empleó información estructural (diámetro, biomasa aérea) proveniente de 16 parcelas permanentes de 1,0 ha, dentro de las cuales se midió la vegetación leñosa arbórea. Se cuantificó la deforestación a nivel departamental usando imágenes de sensores remotos MODIS para el periodo 2000-2007. Los resultados evidencian que la **BA** y los contenidos de carbono en los bosques naturales de Antioquia, presentan una relación inversa con la altitud. La **BA** promedio fue $244 \pm 63 \text{ Mg ha}^{-1}$ y la tasa de deforestación en el periodo 2000-2007 fue $25.279 \text{ ha año}^{-1}$. Durante este periodo se perdieron en total 176.950 ha de bosque natural, con las cuales se emitieron potencialmente a la atmósfera 79.161,29 Gg CO_2 . En Antioquia posiblemente problemáticas como la deforestación, pueden llegar a destruir considerablemente estos ecosistemas, ocasionando la pérdida de servicios ecosistémicos importantes como el almacenamiento de carbono.

Palabras clave: biomasa aérea, bosques tropicales andinos, contenidos de carbono, emisiones potenciales de CO_2 , gradiente altitudinal, parcelas permanentes

Abstract

Tropical forests store large amounts of carbon (CO_2) in their biomass, thus playing a key role in the global cycle of this element. The carbon storage capability of tropical forests is largely determined by biophysical factors. However, in recent years tropical deforestation has converted this ecosystem into a source of carbon emissions into the atmosphere. In this study, our goal was to evaluate the distribution of above-ground biomass (**AGB**) along

Recibido: marzo 2011; aceptado: octubre 2011.

¹ IDEAM (Colombia), Fundación Natura, Fundación Gordon y Betty Moore. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Bogotá D.C., Colombia.

² Docente. Forestal, Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín). Medellín (Antioquia), Colombia.

³ Proyecto Expedición Antioquia. Grupo de Investigación en Conservación, Uso y Biodiversidad. Universidad Nacional de Colombia (sede Medellín). Medellín (Antioquia), Colombia.

⁴ Departamento de Ecología, Universidad Alcalá de Henares. Alcalá de Henares, España.

⁵ Proyecto Expedición Antioquia. Instituto de Biología, Universidad de Antioquia. A. A. 1226. Medellín (Antioquia), Colombia. Correos electrónicos: ⁶ <apyepes@gmail.com>; ⁷ <ajduque09@gmail.com>; ⁸ <danavarrete@gmail.com>;

⁹ <phillipsb77@gmail.com>; ¹⁰ <edersson.cabrera@gmail.com>; ¹¹ <acorral0@unal.edu.co>; ¹² <esalvarez@une.net.co>;

¹³ <gusgalin@gmail.com>; ¹⁴ <mccarciad@gmail.com>; ¹⁵ <alvaro.idarraga@gmail.com>; ¹⁶ <dmvargas.ideam@gmail.com>.

a complex environmental gradient of natural forests in the Department of Antioquia (Colombia); as well as to assess the potential amount of carbon released into the atmosphere by deforestation between 2000 and 2007. We used structural information (diameter, aerial biomass) from 16 1-ha permanent plots where woody vegetation was sampled. Deforestation in the department was quantified using MODIS terra images obtained from 2000-2007. We found a negative relationship between AGB and altitude in natural forests in Antioquia. Mean AGB was 244 ± 63 Mg ha⁻¹ and the deforestation rate in the 2000-2007 period was 25, 279 ha yr⁻¹. During this time, 176,950 ha of natural forest were lost, which means a total of 79,161.29 Gg CO₂ were released into the atmosphere. In Antioquia, problems such as deforestation may result in a considerable destruction to this ecosystem, causing the loss of important ecosystem services, such as carbon storage.

Key words: above-ground biomass, altitudinal gradient, Andean tropical forests, carbon stocks, potential CO₂ emissions, permanent plots

INTRODUCCIÓN

Se estima que los bosques tropicales contienen hasta 80% del total del carbono almacenado en toda la vegetación terrestre, lo que los convierte en un determinante del ciclo global de este elemento (Clark 2007, Gitay et al. 2002, Phillips y Gentry 1994). Considerando únicamente la biomasa aérea, se estima que esta representa 60% o más del total de las reservas de carbono en la vegetación (Aragao et al. 2009, Chave et al. 2003, Malhi et al. 2004). En América del Sur por ejemplo, se han reportado bosques maduros tropicales que almacenan entre 150-200 Mg C ha⁻¹ (Houghton et al. 2001, 2005, Malhi et al. 2006, Saatchi et al. 2007).

No obstante, la mayoría de estos estudios se han realizado en bosques tropicales de tierras bajas (Bunker et al. 2005, Chave et al. 2003, Clark et al. 2003, Nascimento y Laurance 2002, Phillips et al. 2004), convirtiendo a los bosques tropicales de montaña en una especie de caja negra en lo que concierne a su capacidad para almacenar y fijar carbono (Chave et al. 2008, Girardin et al. 2010, Homeier et al. 2010, Sierra et al. 2007 a, b). Lo anterior, hace que un conocimiento acerca de la distribución absoluta de la biomasa y las reservas de carbono de los bosques tropicales en general, continúe siendo limitado (Brown 1997, Clark y Clark 2000, Sierra et al. 2007a).

La alta variabilidad en los valores de biomasa aérea, y por ende, de carbono almacenado en los

bosques tropicales, probablemente esté relacionada a aspectos biofísicos de los sitios, los cuales a su vez determinan características estructurales como el tamaño, frecuencia y distribución de los árboles (Clark y Clark 2000, De Castilho et al. 2006, Laurance et al. 1999, Whitmore 1984). Por ejemplo, el incremento en altitud asociado con la disminución de la temperatura, incremento de la nubosidad, baja disponibilidad y asimilación de nutrientes, incidencia de fuertes vientos y elevada radiación ultravioleta, limita la capacidad fotosintética de los árboles y la asignación de recursos para la construcción de biomasa (Flenley 1996, Leuschner et al. 2007). Por esta razón, a lo largo del gradiente altitudinal en ecosistemas montañosos tropicales como es el caso del norte de los Andes, lo que se esperaría es la disminución paulatina de la biomasa aérea a medida que aumenta la elevación sobre el nivel del mar. Sin embargo, no solo factores naturales afectan el comportamiento de la biomasa aérea y las reservas de carbono de los bosques. En los últimos años la conversión de bosque a no bosque, ha hecho que estos ecosistemas se conviertan en una fuente de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera (Eggleston et al. 2006, Fearnside y Laurance 2004, Houghton 2005, Olander et al. 2008).

En el departamento de Antioquia (Colombia), la deforestación especialmente con fines de ampliación de la frontera pecuaria y agrícola (Orrego 2009), sumado al uso de tierras para cultivos ilícitos, ha posicionado esta región como una de las zonas con mayor tasa de

pérdida de bosque de todo el país (Cabrera et al. 2010). Por este motivo, se hace necesario evaluar y promover el mantenimiento de servicios ambientales derivados de los bosques naturales remanentes, tales como la capacidad de almacenamiento del carbono, los cuales están seriamente amenazados por la deforestación.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la distribución de la biomasa aérea y la pérdida potencial de carbono por deforestación —en los presentes análisis de este estudio, no se tuvieron en cuenta los porcentajes de biomasa que se descomponen o se queman posterior a la deforestación tropical. Estudios futuros deberán contemplar ambas actividades para enriquecer el conocimiento de la dinámica del carbono en bosques andinos—, en relación con la variación altitudinal de los bosques naturales del departamento de Antioquia (Colombia). El estudio busca responder las siguientes preguntas de investigación: **i)** ¿cómo varía la biomasa aérea de los árboles a lo largo del gradiente altitudinal en bosques tropicales andinos del departamento de Antioquia?, **ii)** ¿cuáles son las reservas potenciales de carbono almacenadas en los bosques de Antioquia? y, **iii)** ¿cuál ha sido la cantidad de CO₂ potencialmente emitida por efecto de la deforestación en la última década en Antioquia? Con los resultados obtenidos, se espera aportar elementos importantes para el conocimiento de la dinámica del carbono en bosques andinos, y generar información que puede ser aplicada a las iniciativas nacionales e internacionales que busquen mitigar y reducir el calentamiento global controlando las emisiones por deforestación y degradación de los bosques (**REDD**) a través de la formulación e implementación de proyectos **REDD**.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El área de estudio se localiza en el departamento de Antioquia (Colombia), abarcando los municipios de Acandí, Amalfi,

Angelópolis, Anorí, Belmira, Caicedo, Carepa, Caucasia, El Bagre, Jardín, Maceo, Necoclí, Puerto Triunfo, Segovia, Támesis y Valdivia. En cada uno de ellos se estableció una parcela permanente de 1,0 ha (100 x 100 m) distribuidas en un gradiente que va desde 8 a 2.800 m.s.n.m. En total se establecieron 16 parcelas y en cada una se midió la vegetación leñosa con diámetro normal [= (**D**) mayor a 10 cm ($D \geq 10$ cm)]. Las características de los sitios se presentan en la tabla 1.

Establecimiento de parcelas. En el marco del Proyecto Expedición Antioquia 2013. Sub-proyecto: Diversidad, dinámica y productividad de los bosques de Antioquia, se establecieron durante los años 2009 y 2010, parcelas cuadradas de 100 x 100 m en cada uno de los sitios identificados por zonas de vida (véase, Holdridge 1967), a excepción de la localizada en bosque seco tropical (parcela A) que se debió modificar a 40 x 250 m, con el fin de poderla acomodar dentro del único fragmento de bosque seco encontrado con un tamaño mínimo para la localización. Las parcelas fueron georreferenciadas tomando como punto base la esquina de inicio. El establecimiento y delimitación se hizo usando una brújula precisión, clinómetro o hipsómetro digital, jalones y cinta métrica para formar una red de subparcelas de 10 x 10 m (100 subparcelas), delimitadas por tubos de PVC en los vértices y marcados de acuerdo con el sistema cartesiano de coordenadas. El montaje de la parcela se realizó de acuerdo con los métodos utilizados en topografía haciendo corrección de distancias por pendiente.

Se midieron los árboles con diámetro normal o a la altura del pecho (**D**) y mayores o iguales a 10 cm ($D \geq 10$ cm), sin embargo, en una subparcela de 0,16 ha se incluyeron los individuos de 1 a 10 cm de D. Para la numeración de los individuos, se siguió una secuencia dentro de los cuadrantes de 20 x 20 m

Tabla 1. Características biofísicas de las parcelas establecidas en el departamento de Antioquia (Colombia) [**CP** = código de parcela; **Zv** = zonas de vida según Holdridge (1987); **A** = altitud (m.s.n.m.); **P** = precipitación (mm año⁻¹); **T** = temperatura anual promedio (°C); **# AxP** = número de árboles por parcela ($D \geq 10$ cm), **D** = diámetro (cm) de árboles medidos a 130 cm sobre el suelo; **AB** = área basal (m² ha⁻¹)]

CP	Municipio de	Coordenadas		Zv	A	P	T	# AxP	AB
	Antioquia	<i>Norte</i>	<i>Oeste</i>						
A	Támesis	06° 00' 22"	74° 36' 38"	bs-T	700	1.000	26,0	427	17,72
B	Caicedo	06° 23' 30"	76° 01' 31"	bmh-M	2.600	2.200	18,0	1.214	34,92
C	Jardín	05° 30' 04"	75° 53' 44"	bh-M	2.600	2.250	15,0	669	36,03
D	Maceo	06° 24' 13"	74° 45' 38"	bh-T	900	2.250	23,8	805	30,82
E	Valdivia	07° 05' 05"	75° 29' 03"	bp-M	2.056	3.500	15,0	903	23,15
F	Caucasia	08° 03' 21"	74° 46' 05"	bh-T	400	3.250	—	362	21,75
G	El Bagre	06° 00' 22"	74° 36' 38"	bmh-T	70	4.250	—	495	22,17
H	Puerto Triunfo	07° 39' 30"	74° 49' 07"	bh-T	400	2.250	30,5	329	17,06
I	Carepa	08° 30' 26"	76° 39' 27"	bh-T	28	2.250	27,5	345	25,57
J	Necoclí	08° 65' 14"	77° 35' 44"	bh-T	8	850	24,0	555	23,54
K	Acandí	08° 65' 14"	77° 35' 44"	bh-T	296	2.250	27,5	577	28,32
L	Anorí	06° 59' 35"	75° 08' 44"	bhm-PM	1.700	2.400	21,0	883	25,41
M	Belmira	06° 36' 90"	75° 39' 46"	bmh-M	2.800	2.100	10,5	526	21,16
N	Angelópolis	06° 09' 32"	75° 41' 99"	bmh-MB	2.200	2.600	—	855	21,65
O	Amalfi	06° 45' 37"	75° 06' 28"	bh-T	1.000	1.920	22,0	732	23,69
P	Segovia	07° 06' 16"	74° 44' 15"	bh-T	800	3.500	—	611	24,17

y dentro de las fajas a través de los cuadrantes. Los árboles mayores a 10 cm de D fueron numerados con láminas de aluminio fijadas con clavos a una altura de 180 cm, para evitar afectar los individuos cerca de la zona de medición del D. La medición del diámetro se realizó con cinta métrica a los 130 cm de altura y se marcó el lugar de medición con tiza para su posterior marcaje con pintura asfáltica amarilla. Aunque esta información no tiene actualmente réplicas para cada zona de vida, sí proviene de un muestreo realizado bajo un protocolo estandarizado y constituye el conjunto de datos más grande que existe para Antioquia en la actualidad.

Estimación de la biomasa aérea. Para la estimación de la biomasa aérea (**BA**) se utilizaron las ecuaciones desarrolladas por Álvarez et al. (Álvarez E, Duque-Motoya AJ, Saldarriaga JG, Cabrera K, De las Salas G, Del Valle JI, Moreno F, Orrego SA, Rodríguez L. *En prep.* Tree allometric biomass equations along a complex environmental gradient in tropical forests of Colombia: a test to pantropical models), para diferentes zonas de vida (Holdridge 1967) (tabla 2). Las ecuaciones se construyeron empleando la información proveniente de 578 árboles apeados en campo en diferentes regiones del país y siguiendo las indicaciones de Chave et al. (2003) (tabla 3); se

evaluó la precisión de la estimación de la biomasa aérea de cada árbol pesado en campo para cada uno de los modelos alométricos generados. La precisión de cada modelo se estimó por medio del *porcentaje de error promedio (PEP)* por zona de vida, asumiendo el menor valor promedio como el mejor (Álvarez et al. *en prep.*, Basuki et al. 2009, Chave et al. 2005, Overman et al. 1994, Saldarriaga

et al. 1988). Las zonas de vida para las cuales se construyeron las ecuaciones fueron bosque seco tropical (**bs-T**), bosque húmedo montano (**bh-M**), bosque pluvial tropical (**bp-T**), bosque húmedo tropical (**bh-T**), bosque muy húmedo tropical (**bmh-T**), bosque húmedo premontano (**bh-PM**) y bosque húmedo montano bajo (**bh-MB**) (para más detalles véase, Holdridge 1967).

Tabla 2. Modelos de regresión por zonas de vida, empleados para el cálculo de la biomasa aérea (Álvarez et al. *en prep.*) [C Zv = código de zonas de vida según Holdridge (1987); BA = biomasa aérea (en kg); DAP = diámetro (cm) de árboles a la altura del pecho (a 130 cm sobre el suelo); ρ = densidad de la madera (g cm^{-3})

Zonas de vida	C Zv	Ecuación alométrica	R ²
Bosque seco tropical	bs-T	$BA = \exp(4,039 - 1,991 \cdot \ln(DAP) + 1,236 \cdot (\ln(DAP))^2 - 0,126 \cdot (\ln(DAP))^3 + 1,283 \cdot \ln(\rho))$	0,9535
Bosque húmedo tropical	bh-T	$BA = \exp(2,828 - 1,596 \cdot \ln(DAP) + 1,236 \cdot (\ln(DAP))^2 - 0,126 \cdot (\ln(DAP))^3 + 0,441 \cdot \ln(\rho))$	
Bosque muy húmedo tropical	bmh-T	$BA = \exp(1,595 - 1,224 \cdot \ln(DAP) + 1,236 \cdot (\ln(DAP))^2 - 0,126 \cdot (\ln(DAP))^3 + 0,691 \cdot \ln(\rho))$	
Bosque húmedo premontano	bh-PM	$BA = \exp(2,479 - 1,415 \cdot \ln(DAP) + 1,236 \cdot (\ln(DAP))^2 - 0,126 \cdot (\ln(DAP))^3 + 1,067 \cdot \ln(\rho))$	
Bosque húmedo montano bajo	bh-MB	$BA = \exp(2,225 - 1,552 \cdot \ln(DAP) + 1,236 \cdot (\ln(DAP))^2 - 0,126 \cdot (\ln(DAP))^3 - 0,237 \cdot \ln(\rho))$	
Bosque húmedo montano	bh-M	$BA = \exp(3,441 - 1,809 \cdot \ln(DAP) + 1,236 \cdot (\ln(DAP))^2 - 0,126 \cdot (\ln(DAP))^3 + 1,743 \cdot \ln(\rho))$	

Para utilizarlas fue necesario compilar información de la densidad de la madera de las especies (g cm^{-3}), dado que las ecuaciones alométricas involucran este parámetro en el cálculo de la BA. La información compilada provino de valores reportados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (Eggleston et al. 2006, IPCC 2003), por Chave et al. (2006) y Zanne et al. (2009). A cada individuo se le asignó el valor de densidad reportado para la especie a la cual pertenecen. Cuando esto no fue posible, se utilizó la densidad para el género, la familia o el promedio de la densidad de las especies registradas en cada parcela.

En los casos en los que no se disponía de una ecuación para una zona de vida específica (e.g., **bmh-M**, **bmh-MB**, **bmh-PM** y **bp-M**), se utilizó el modelo correspondiente a la zona de vida más afín; por ejemplo, no existe una ecuación particular para la zona de vida bosque muy húmedo tropical (**bmh-T**), así que en este caso se empleó la de bosque húmedo tropical (**bh-T**). La biomasa aérea total (BA) de cada parcela, se calculó como la suma de la biomasa de todos los árboles, excluyendo individuos pertenecientes a hábitos de crecimiento como palmas, lianas y helechos arbóreos. Los valores de biomasa aérea luego fueron multiplicados por un factor de 0,5 para obtener el equivalente

Tabla 3. Descripción de los sitios con información de biomasa aérea a través de la cosecha de árboles en Colombia (Fuente: Álvarez et al. *en prep.*) [**Loc** = localidad; **A** = altitud (m.s.n.m.); **P** = precipitación (mm); **D** = diámetro (cm) de árboles medido a 130 cm sobre el suelo; **mn** = mínimo; **mx** = máximo; **H** = altura total de los árboles (m); **r** = densidad de la madera (g cm⁻³); **BA** = biomasa área basal (kg); ¹Álvarez (1993), ²Rodríguez (1991), ³Overman (1994), ⁴Rodríguez (1987), ⁵Brandeis et al. (2006), ⁶De las Salas (1978), ⁷este estudio; ⁸Sierra et al. (2007b), ⁹UNAL y CORNARE (2002), ¹⁰Saldarriaga (1988)]

Localidad	Región	Coordenadas			A	P	D		H		r		BA	
		latitud	longitud					mn	mx	mn	mx	mn	mx	mn
1 AraL	Amazonia	00° 37' 28" S	72° 06' 24" O	100	3.060	10,0	130,0	3,4	44,3	0,40	1,00	0,4	17.994,9	1
2 AraP	Amazonia	00° 34' 17" S	72° 06' 21" O	100	3.060	10,0	55,0	6,6	31,5	0,50	0,90	4,6	3.668,7	2
3 AraT	Amazonia	00° 38' 01" S	72° 22' 07" O	100	3.060	10,0	97,9	8,5	39,3	0,30	0,90	19,9	12.643,4	3
4 Bcal	Choco	03° 59' 55" N	76° 57' 31" O	50	8.000	10,0	37,5	4,5	30,0	0,40	0,80	3,9	1.597,2	4
5 BPRico	Puerto Rico	17° 58' 37" N	66° 40' 18" O	—	800	10,0	45	2,8	15,3	0,31	0,87	2,1	1.104,6	5
6 CarOp	Magdalena valley	06° 35' 02" N	73° 55' 28" O	300	3.000	10,0	84,3	3,7	36,2	0,30	0,80	8,9	7.125,3	6
7 CariS	Caribe coast	10° 37' 45" N	75° 13' 55" O	30	1.030	10,0	51,0	2,8	18,4	0,30	0,80	3,6	933,7	7
8 Pied	East Andes	07° 02' 48" N	73° 00' 09" O	2.350	2.100	10,0	62,7	3,9	26,7	0,40	0,80	4,7	3.948,3	7
9 Porce	Central Andes C	06° 46' 51" N	75° 06' 46" O	1.000	3.050	10,0	198,9	1,3	46,7	0,20	0,80	0,1	27.504,8	8
10 Rmelc	Magdalena valley	06° 27' 41" N	75° 10' 58" O	500	3.000	10,0	84,4	8,6	39,0	0,20	0,90	18,8	8.181,0	9
11 Shel	Central Andes	06° 16' 52" N	75° 30' 10" O	2.500	2.500	10,0	38,3	6,0	17,8	0,40	0,70	39,7	1.115,0	9
12 SCRion	Amazonia	01° 52' 11" N	67° 03' 55" O	100	3.565	10,0	136,8	2,5	37,9	0,30	0,80	0,2	9.816,2	10
13 Svic	East Andes	06° 54' 05" N	73° 18' 04" O	1.300	2.000	10,0	59,5	2,2	26,7	0,40	0,80	0,4	2.487,3	7
14 Tona	East Andes	07° 04' 51" N	02° 55' 58" O	3.100	1.069	10,0	26,5	3,2	13,0	0,40	0,70	0,3	194,1	7

en términos de carbono almacenado por la vegetación (Eggleston et al. 2006).

Tasa de deforestación en el departamento de Antioquia período 2000-2007. La tasa de deforestación se cuantificó a nivel departamental usando imágenes de sensores remotos para el periodo 2000-2007. Para ello se utilizó la definición de bosque basada en las clasificaciones de coberturas de bosque de las leyendas de CORINE *Land Cover* (versiones 1 y 2). De esta manera las unidades del mapa de uso y cobertura de CORINE *Land Cover* que se consideraron para los fines del ejercicio de deforestación, fueron: bosque denso, bosque abierto, bosque de galería o ripario y bosque fragmentado. Se emplearon imágenes MODIS Terra, con una resolución espacial de 250 m (productos *MOD09A1*, *Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500 m* y *MOD09Q1*, *Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250 m*). El procesamiento de las imágenes se realizó empleando el software CLASlite (<www.claslite.ciw.edu>). Detalles específicos de la metodología se encuentran disponibles en Cabrera et al. (2010) e IDEAM (2009).

Adicionalmente se realizó una evaluación de la exactitud temática de los productos cartográficos generados implementando un muestreo sistemático basado en una cuadrícula con intervalos de 1 grado (latitud/longitud). En las intersecciones de la cuadrícula se ubicaron unidades de muestreo de 20 x 20 km, evitando la superposición. El tamaño de la muestra se determinó tomando como referencia los siguientes parámetros: intervalo de confianza de 95%, error admisible de 0,05 (+) y probabilidad de una clasificación correcta de 0,5. Como fuente de información para la evaluación del mapa de Bosque/No Bosque se utilizaron imágenes de media resolución espacial Landsat (TM y ETM+) para los años de referencia, las cuales se constituyen en un insumo de mayor resolución espacial que las imágenes utilizadas como base para la generación de los mapas.

Para el área del departamento de Antioquia se identificaron en total nueve unidades de muestreo. Al interior de cada una de ellas se distribuyeron aleatoriamente cuatro sitios de verificación, para un total de 36 puntos muestreo. La localización espacial de los puntos de verificación se realizó aleatoriamente manteniendo una distancia mínima de 5 km entre punto y punto para evitar problemas de auto-correlación espacial. Estos sitios fueron superficies cuadradas de 25 ha dentro de las cuales se verificó la exactitud temática de la clasificación de los mapas de Bosque/No Bosque a través de interpretación visual de las coberturas (Cabrera et al. 2011).

Estimación de las emisiones para el período de análisis. Para la estimación de las emisiones potenciales de CO₂ se siguieron los lineamientos básicos del IPCC para la realización de los inventarios de gases de efecto invernadero (IPCC 1996) aplicando una aproximación gruesa. Para ello se empleó el valor promedio de carbono estimado a partir del valor promedio de biomasa aérea calculado para el departamento, luego de utilizar las ecuaciones alométricas disponibles. Posteriormente, el valor promedio de carbono estimado a nivel departamental, fue multiplicado por la superficie total deforestada durante el período de análisis (2000-2007), obteniendo así la cantidad de carbono potencialmente emitido. Finalmente, para convertir la cantidad de carbono almacenada en los bosques naturales a la medida métrica utilizada para estimar las emisiones de varios GEI (e.g., dióxido de carbono equivalente, CO₂), se multiplicó la cantidad de toneladas de carbono que almacenan los bosques por 3,67 —*este factor resulta de dividir el peso atómico de una molécula de dióxido de carbono (e.g., 44), por el peso específico del carbono (e.g., 12)*— (Eggleston et al. 2006, IPCC 2003). Esta metodología se considera una buena práctica por parte del IPCC (Eggleston et al. 2006, IPCC 2003) para obtener estimados de emisiones a grandes escalas de manera conservadora.

Análisis de datos. Para identificar las relaciones entre la biomasa aérea y la altitud, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson considerando todos los datos y agrupando las parcelas en dos clases de altitud siguiendo el concepto de *cloud forest immersion zone* propuesto recientemente por Girardin et al. (2010). Como *bosques de tierras bajas* (**B TB**) se clasificaron aquellas parcelas localizadas entre 0-1.500 m.s.n.m, y como *bosques de tierras altas* (**B TA**), aquellas localizadas por encima de la cota 1.500 m; esta clasificación agrupó diferentes zonas de vida en cada caso. Para cada clase se calculó la biomasa aérea promedio por hectárea, junto con los estadísticos respectivos de desviación estándar (**DE**) y coeficiente de variación (**CV%**).

Se realizó una prueba de comparación de medias para evaluar las diferencias entre la biomasa aérea de estas dos clases de altitud definidas. Finalmente, teniendo en cuenta el área existente bajo la cobertura de bosques en el departamento de Antioquia para el año 2007, y la tasa de deforestación departamental para el período 2000-2007, se estimaron las emisiones totales potenciales de CO₂ para el área bajo el supuesto de que la tendencia actual de deforestación continúe en los próximos años.

RESULTADOS

Biomasa aérea de los bosques. La biomasa aérea presentó valores entre 144 y 352 Mg ha⁻¹, que equivalen a un ámbito de 72-176 Mg C ha⁻¹ (tabla 4). La variación total de la biomasa aérea fue de 26% y el promedio departamental de 244 ± 63 Mg ha⁻¹, lo cual equivale a un promedio de carbono almacenado de 122 ± 31 Mg C ha⁻¹. De otro lado, la correlación entre la biomasa aérea y la altitud fue negativa y significativa ($r = -0,5176$, $P = 0,04$, $n = 16$; figura 1).

El aporte de los árboles grandes ($D \geq 10$ cm) a la biomasa aérea, fue alto (> 70%). En particular, los árboles con $D \geq 70$ cm

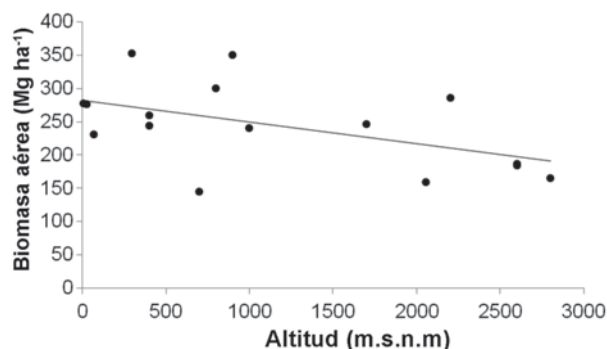


Figura 1. Comportamiento de la biomasa aérea por hectárea (Mg ha⁻¹) en función de la altitud

aportaron el 53% de la biomasa aérea. Sin embargo, la presencia o ausencia de árboles de gran tamaño en cada uno de los sitios, también determinó la distribución de la biomasa aérea para cada uno de ellos, lo cual se refleja en los altos coeficientes de variación obtenidos para esta variable, especialmente en el caso de los árboles con $1 \text{ cm} < D < 10 \text{ cm}$ (tabla 4). Por ejemplo, sitios como Belmira, Maceo y Valdivia se caracterizaron por presentar alta abundancia de árboles con biomasa que oscilan entre 2,00 y 5,00 kg ha⁻¹, mientras que sitios como Carepa, Caucasia, El Bagre y Puerto Triunfo, presentaron en su mayoría, árboles con biomasa mayor a 80 kg ha⁻¹. En cuanto a la distribución de la biomasa aérea por clase diamétrica, ésta incrementó en función de las clases de tamaño, alcanzando los valores más altos en las clases de 20-30 y 40-70 cm. En algunos sitios, como en la región del Urabá antioqueño (Acandí, Carepa y Necoclí), la clase $D > 70 \text{ cm}$, tuvo aportes muy altos. La edad y grado de intervención de los sitios, pueden explicar también estos resultados.

Variación de la biomasa aérea por tipos de bosque según su posición altitudinal. Cuando se analizó la biomasa aérea agrupando las parcelas en dos clases de acuerdo con la altitud, diez de los sitios muestreados pertenecieron a **B TB**

Tabla 4. Biomasa aérea por hectárea para cada uno de los sitios muestreados y por categoría diamétrica. Se presentan además el promedio departamental para cada caso más menos desviación estándar ($\pm$ DE) y coeficiente de variación (CV) [CP = código de parcela; D = diámetro (cm) de árboles medido a 130 cm sobre el suelo]

CP	Municipio de Antioquia	Biomasa aérea (Mg ha ⁻¹)		Total (Mg ha ⁻¹)
		$1 < D < 10$	$D \geq 10$	
A	Támesis	60,4	84,4	144,9
B	Caicedo	60,3	124,5	184,7
C	Jardín	58,9	128,0	186,9
D	Maceo	63,3	286,5	349,9
E	Valdivia	76,0	83,5	159,5
F	Caucasia	23,3	220,2	243,5
G	El Bagre	24,3	206,4	230,7
H	Puerto Triunfo	74,1	185,7	259,7
I	Carepa	45,9	230,9	276,7
J	Necoclí	70,3	206,9	277,2
K	Acandí	47,1	305,3	352,4
L	Anorí	49,5	196,9	246,4
M	Belmira	50,7	114,0	164,8
N	Angelópolis	116,5	169,7	286,8
O	Amalfi	43,5	196,7	240,2
P	Segovia	79,6	220,9	300,5
Promedio		58,9	185,0	244,0
$\pm$ DE		22,5	64,9	63,5
CV (%)		38,1	35,1	26,0

y seis a **B TA**. Los resultados sugieren que en efecto, los **B TB** se caracterizan por tener mayores valores de biomasa área (267 ± 60 Mg ha⁻¹), en comparación con los **B TA** (102 ± 25 Mg ha⁻¹; tabla 5). Los análisis estadísticos realizados, evidencian diferencias significativas entre los promedios de la biomasa aérea para los bosques agrupados en estas dos categorías de altitud definidas ($t = -6,289$; $P = 0,000019$), con lo cual se observó una tendencia interesante respecto a la relación entre ambas variables.

Tasas de deforestación para los bosques de Antioquia y su efecto sobre las reservas de carbono aéreo. Los resultados de la evaluación

temática indicaron que la exactitud global del mapa 2000 asciende a 91,16% mientras que para el mapa 2007 resultó en 93,43%. Este resultado indica un ajuste adecuado de los resultados de la clasificación temática *versus* los datos de verificación utilizados. Analizando los errores de omisión/comisión, de acuerdo con los puntos de verificación, se encuentra que para el mapa 2000, 97,58% de la clase Bosque se encuentra bien clasificada, mientras que para el mapa 2007 es de 98,51%. Complementariamente con estas métricas de exactitud, se calculó el índice de Kappa para permitir comparaciones con otros productos cartográficos, resultando que para el mapa 2000 se obtiene un valor de $82,2\% \pm$

Tabla 5. Biomasa aérea y carbono asociado por hectárea, para los bosques de tierras bajas (**B TB**) y tierras altas (**B TA**) del área de estudio en Antioquia (Colombia) ($\bar{X}$ = promedio; **DE** = desviación estándar; **CV** = coeficiente de variación asociado; **N** = número de parcelas)

Variable estructural	Estadísticos	B TB	B TA
Biomasa aérea (t ha ⁻¹)	$\bar{X} \pm DE$	267,57 $\pm$ 60,58	102,38 $\pm$ 25,22
	CV (%)	22,64	24,63
	N	10,00	6,00
Carbono almacenado (t C ha ⁻¹)	$\bar{X} \pm DE$	133,79 $\pm$ 30,29	51,19 $\pm$ 12,61
	CV (%)	22,64	24,63
	N	10,00	6,00

5,61, mientras que para el mapa 2007 asciende a 86,8% $\pm$ 4,87. Ambos índices sugieren una exactitud temática adecuada, que permite cuantificar la deforestación para Antioquia con baja incertidumbre.

De esta manera, la deforestación promedio anual estimada para Antioquia durante el período 2000-2007 fue de 25.279 ha año⁻¹, para un total de 176.950 ha deforestadas durante ese período (figura 2). En esencia, el área total de bosques en Antioquia pasó de 2.404.769 ha en el año 2000, a 2.227.819 ha en el 2007. Esto en términos de carbono almacenado en los bosques naturales del departamento, corresponde a 271.813,35 Gg C aún no emitidas a la atmósfera, es decir, 996.648,95 Gg CO₂ almacenadas. Las áreas más afectadas por la deforestación durante el período de análisis, fueron el noreste y noroccidente de Antioquia. De continuar esta tendencia de manera lineal, y teniendo en cuenta que el promedio departamental de almacenamiento de C fue de 122,01 Mg C ha⁻¹, durante el período de análisis se pudo haber emitido en promedio, 21.589.443 Mg C, correspondientes a 7,36% de las existencias que habían en el año 2000 (293.402,79 Gg C = 1.075.810,24 Gg CO₂), y 0,30% de las reservas actuales estimadas para los bosques naturales en Colombia (Phillips et al. 2011).

Si este mismo análisis se realiza individualmente para los **B TB** y **B TA**, por cada hectárea deforestada, se emitirían en promedio 133,79 Mg C ha⁻¹ en el caso de los **B TB**, y 51,19 Mg C ha⁻¹ en el caso de los **B TA**. Según nuestros análisis durante el periodo 2000-2007 la tasa de deforestación fue mayor para los **B TB** con respecto a la que se presentó en los **B TA** (27.210,71 ha *versus* 6.199,30 ha). Esto ocasionó emisiones de C de 50.965,77 Gg y 4.442,78 Gg, respectivamente.

Es importante anotar en esta parte, que aunque la articulación de las estimaciones de biomasa aérea y carbono con la información de sensores remotos (e.g., cuantificación de la deforestación) no se realizó *pixel a pixel*, dada la escasez de datos de campo, la metodología utilizada es aceptada internacionalmente y se considerada una buena práctica por parte del IPCC (Eggleston et al. 2006, IPCC 2003) para obtener estimados de emisiones a grandes escalas de manera conservadora. Este hecho puede ser una limitación de nuestro estudio, pero hasta ahora constituye una de las primeras aproximaciones para la estimación de emisiones e CO₂ a nivel departamental, empleando los insumos disponibles.

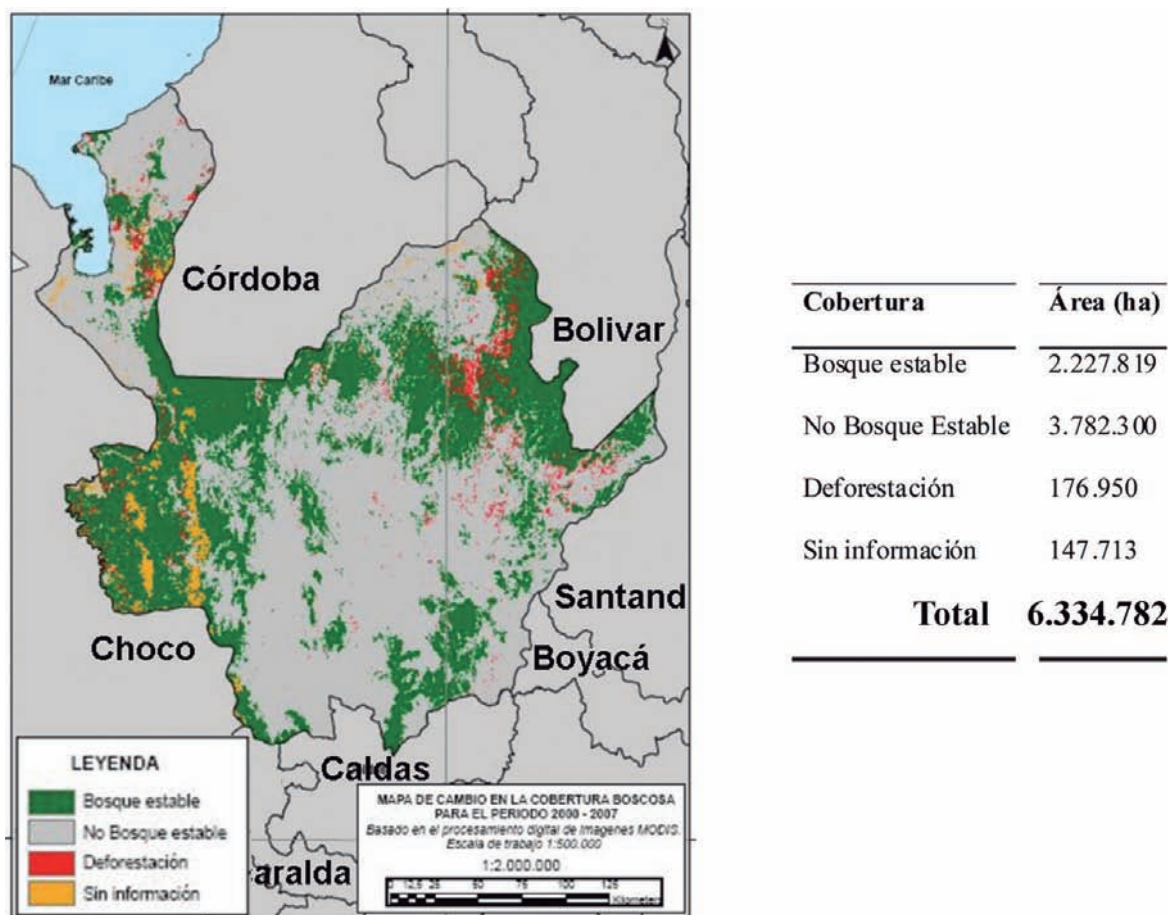


Figura 2. Deforestación para el departamento de Antioquia (Colombia) en el período 2000-2007

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La biomasa aérea y por tanto los contenidos de carbono almacenados en los bosques de Antioquia, mostraron una relación inversa con la altitud, similar a la registrada para otros bosques tropicales (Aiba y Kitayama 1999, Richards 1996, Wang et al. 2006). El recambio en densidad de árboles positivamente asociado con la altitud, evidencia el reemplazo de árboles grandes en tierras bajas por muchos árboles pequeños en tierras altas (véase, Giraldo et al. 2010). Esta tendencia se da como consecuencia del aumento sistemático de limitaciones fisiológicas impuestas a las plantas leñosas por las bajas temperaturas, las altas pendientes, la mayor nubosidad y la mayor limitación

de nutrientes, cuando se asciende en altitud (Flenley 1996, Leuschner et al. 2007).

Adicionalmente se pudo establecer que los árboles de mayores dimensiones ($D > 70$ cm) contribuyeron con la biomasa aérea del bosque en aproximadamente 53% [véase resultados similares en Clark y Clark (1996) y DeWalt y Chave (2004)]. Este comportamiento fue más notorio en los B TB, que se caracterizaron por presentar mayores abundancias de este tipo de árboles. Se concluye por tanto que, la persistencia o pérdida de árboles grandes, podría afectar sustancialmente la cantidad de biomasa aérea del ecosistema, convirtiendo los bosques en sumideros o fuentes de carbono (Clark y Clark 1996). Para el caso del área de estudio, en

B TB donde es común la explotación selectiva de árboles de gran tamaño (Cavelier y Etter 1995, Gutiérrez 2008), se puede estar afectando significativamente las reservas de carbono y otros servicios ecosistémicos asociados (Aubad et al. 2008). No obstante, esta hipótesis deberá ser validada posteriormente.

Aunque existen estudios para el departamento de Antioquia que han tenido por objetivo estimar la biomasa aérea de los bosques naturales (e.g., Orrego y del Valle 2003, Yepes et al. 2010), los resultados de nuestro estudio representan la primera estimación de las reservas o *stocks* de carbono almacenado en los bosques naturales a nivel departamental. Asimismo, exponen información reciente sobre la deforestación de dichos bosques para la última década. A nivel departamental, se tiene que de las 6.334.782 ha que conforman el territorio antioqueño, 2.404.769 ha correspondían a bosques naturales en el año 2000, y posteriormente por efecto de la deforestación, pasaron a ser 2.227.819 ha en el año 2007. La tasa de deforestación durante este período fue de 25.279 ha año⁻¹ y se perdieron en total 176.950 ha de bosque natural. Esta tendencia es diferente a la encontrada por Orrego (2009) para el período 1980-2000, donde se concluye que la cobertura de bosques naturales (bosques densos + bosques mixtos) tendió a aumentar en los 20 años del análisis (2.105.750 vs. 2.647.600 ha), por efecto de la recuperación de áreas que se encontraban bajo las coberturas de pastos y cultivos en 1980. La diferencia en los estimados para el año 2000 entre ambos estudios fue de 242.831 ha. Sin embargo, discrepancias metodológicas en términos de definiciones y escalas, y las técnicas de clasificación y sensores utilizados, hacen difícil la comparación entre estudios.

De otro lado, según nuestros resultados aunque el porcentaje de emisiones de carbono durante el período de análisis fue relativamente bajo si se compara con la cantidad de carbono almacenado en dichos ecosistemas, de

continuar esta tendencia (asumiendo tendencia lineal), los bosques de Antioquia podrían ser fuentes de emisiones de CO₂ importantes. Los resultados mostraron además que las emisiones de CO₂ por efecto de la deforestación serían más altas en los **B TB**, donde tanto los contenidos promedios de carbono almacenado ($133,79 \pm 30,29 \text{ t C ha}^{-1}$), como la tasa de deforestación ($27.210,71 \text{ ha año}^{-1}$) fueron mayores. Lo anterior se debe principalmente a que los **B TB** poseen mejores condiciones para el establecimiento de sistemas agrícolas o de ganadería (e.g., pendiente, profundidad del suelo, drenaje) (Etter et al. 2006), y a que en general, presentan mejores facilidades de acceso, lo que promueve la ampliación de la frontera pecuaria y agrícola. No obstante, aunque en este estudio sólo se consideró el carbono contenido en el compartimento aéreo, es posible que si se incluyera en el futuro el carbono almacenado en los suelos, la degradación ecosistémica en bosques de alta montaña, podría igualar fácilmente las emisiones de tierras bajas, debido a la relación inversa que existe entre los contenidos de carbono en suelos con la altitud (Leuschner y Moser 2008). Estudios posteriores deberán ser realizados para corroborar esta hipótesis.

A partir de nuestros resultados se puede concluir que problemáticas como la deforestación, ya sea por expansión de la frontera agrícola y ganadera, o establecimiento de cultivos ilícitos, pueden llegar a destruir considerablemente estos ecosistemas, ocasionando entre otros problemas la pérdida de servicios ecosistémicos importantes como lo es el almacenamiento de carbono. Particularmente en este último aspecto, se ha centrado recientemente la atención de la comunidad internacional, debido a que la conservación o manejo sostenible de los contenidos de carbono en bosques, puede actuar como un nuevo mecanismo de mitigación para contrarrestar los efectos adversos del cambio ambiental global sobre el clima del planeta.

Finalmente, con respecto a los análisis de deforestación y su posterior relación con las emisiones potenciales de carbono a la atmósfera, un aspecto clave es que los futuros estudios de este tipo, utilicen definiciones unificadas en relación con las categorías de uso de la tierra y coberturas (e.g., bosque) para que los resultados sean comparables y permitan documentar la evolución de estos procesos en el tiempo sin mayores dificultades. Esto es un punto crítico también, para el desarrollo de estudios de factibilidad tendientes a la formulación e implementación de proyectos de *Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación* de los bosques (**REDD**), más aún si se tiene en cuenta, que bosques tropicales tienen un alto potencial por las cantidades de carbono que almacenan (Clark 2007, Gitay et al. 2002, Phillips et al. 2004, Sierra et al. 2007a, b).

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este texto quieren agradecer a Juan David Orozco, Administrador Finca La Guamo y a la Fundación Berta Arias. A Juan Lázaro Toro, funcionario Corantioquia; Gustavo Suárez de la Fundación Colibrí; Rodrigo Celis, propietario Finca San Pedro; Javier Torres, propietario Finca Santa Lucía; Carlos Posada, Gerente Empresas Pecuarias del Bajo Cauca; Carlos Mario Vélez, Administrador General Hacienda Egipto; Ingenieros Carlos Tamayo y Gonzalo Escobar, Área Ambiental Mineros S. A.; Jorge Iván González, Administrador General Finca Cerritos; Ana Lucía Vélez y Mónica Cano, Corpourabá; Ramón Verona, Vicepresidente JAC Caribia; Andrés Upegui, Director Parque Agua Viva, Consejo Comunitario de Comunidades Negras de Sapzurro. También queremos agradecer a Juan Esteban Calle, Wilson Rengifo, Fredy Arcila y Patricia Cortez del Centro de Investigaciones Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Antioquia. A David Sierra, Alberto Posada, Camilo Sánchez, Dino Tuberquia,

Fernando Giraldo, Jorge Pérez, Heriberto Marín y Adriana Rivas, quienes colaboraron con la determinación de parte del material vegetal de las parcelas. Al Herbario de la Universidad de Antioquia (**HUA**); Al Laboratorio de Ecología César Pérez Figueroa de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín por el préstamo de equipos e instalaciones. A los auxiliares de campo Miguel Guerrero, Oscar J. Morales, Dulfary Gómez, Luis Alberto Quiroz, Ramiro Arenas, Luz Amparo Arenas, Luz Dari Henao, Marina Uribe, Jaime Medina, Darío Restrepo, Elkin David Torres, Elkin Quiñonez, Duaner Maurys, Baltazar Hincapié, Siomara Andrea Guarín. A Diego León Castillo, Administrador Finca La Sierrita; Juan Carlos García, Administrador Finca Bella Luz; Fernando Corrales y Julia Osorio por facilitarnos alojamiento en la región. A todos aquellos que de una manera u otra colaboraron con el desarrollo de este trabajo, y que aquí no se mencionan por cualquier motivo.

REFERENCIAS

- Aiba SI, Kitayama K. 1999. Structure, composition and species diversity in an altitude–substrate matrix of rain forest tree communities on Mount Kinabalu, Borneo. *Plant Ecology*, 140: 139-157.
- Aubad J, Arago P, Olall-Tarraga M, Rodríguez M. 2008. Illegal logging, landscape structure and the variation of tree species richness across North Andean forest remnants. *Forest Ecology and Management*, 255: 1892-1899.
- Álvarez E. 1993. Composición florística, diversidad, estructura y biomasa de un bosque inundable en la Amazonia Colombiana. [Tesis de Maestría] [Medellín (Colombia)]: Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Antioquia. p 120.
- Aragao L, Malhi Y, Metcalfe DB, Silva-Espejo JE, Jiménez E, Navarrete D, Almeida S, Costa ACL, Salinas N, Phillips OL, Anderson, LO, Alvarez E, Baker TR, Goncalvez PH, Huamán-Ovalle J, Mamani-Solórzano M, Meir P, Monteagudo A, Patiño S, Peñuela MC, Prieto A, Quesada CA, Rozas-Dávila A, Rudas A, Silva Jr JA, Vásquez R. 2009. Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. *Biogeosciences*, 6: 2759-2778.
- Basuki TM, van Laake PE, Skidmore AK, Hussin YA. 2009. Allometric equations for estimating the above-ground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management*, 257: 1684-1694.

- Brandeis TJ, Delaney M, Parresol BR, Royer L. 2006. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. *Forest Ecology and Management*, 233: 133-142.
- Brown S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. Forestry Paper 134. Rome (Italy): FAO. p. 215.
- Bunker DE, Declerk F, Bradford JC, Colwell RK, Perfecto I, Phillips OL, Sankaran M, Naeem S. 2005. Species loss and aboveground carbon storage in a tropical forest. *Science*, 310: 1029-1031.
- Cabrera E, Galindo G, Vargas D [Internet]. 2010. Informe ejecutivo ejercicio de estimación de la tasa de deforestación para Colombia periodo 2000-2007. Proyecto "Capacidad Institucional Técnica Científica para apoyar Proyectos REDD: Reducción de Emisiones por Deforestación en Colombia". Bogotá (Colombia): Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM. Fecha de acceso: 10 octubre 2011. Disponible en: <http://claslite.ciw.edu/documents/user_project_gallery/Inf_ejecutivo_Met_deforestacion_preliminar2000_2007.pdf>.
- Cabrera E, Vargas DM, Galindo G. 2011. Cuantificación de la deforestación histórica para Colombia, escala gruesa y fina. Memoria Técnica Proyecto "Capacidad Institucional Técnica Científica para apoyar Proyectos REDD: Reducción de Emisiones por Deforestación en Colombia". Bogotá (Colombia): Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- Cavelier J, Etter A. 1995. Deforestation of montane forest in Colombia as result of illegal plantations of opium (*Papaver somniferum*). En: Churchill P, Baslev H, Forero E, Luteyn JL, editores. Biodiversity and Conservation of Neotropical Montane Forests. New York (USA): New York Botanical Garden. p. 541-549.
- Chave J, Condit R, Lao S, Caspersen JP, Foster RB, Hubbell SP. 2003. Spatial and temporal variation of biomass in a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 91: 240-252.
- Chave J, Andalo C, Brown S, Cairns MA, Chambers JQ, Eamus D, Folster H, Fromard F, Higuchi N, Kira T, Lescure JP, Nelson BW, Ogawa H, Puig H, Riéra B, Yamakura T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145: 87-99.
- Chave J, Muller-Landau HC, Baker TR, Easdale TA, ter Steege H, Webb CO. 2006. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2,456 Neotropical tree species. *Ecological Applications*, 16 (6): 2356-2367.
- Chave J, Olivier J, Bongers F, Chatelet P, Forget PM, Meer PVD, Norden N, Riéra B, Charles-Dominique P. 2008. Above-ground biomass and productivity in a rain forest of eastern South America. *Journal of Tropical Ecology*, 24: 355-336.
- Clark DA. 2007. Detecting tropical forests responses to global climatic and atmospheric change: current challenges and a way forward. *Biotropica*, 39 (1): 4-19.
- Clark DB, Clark DA. 1996. Abundance, growth and mortality of very large trees in Neotropical lowland rain forest. *Forest Ecology and Management*, 80: 235-244.
- Clark DA, Clark DB. 2000. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management*, 137: 185-198.
- Clark DA, Piper SC, Keeling CD, Clark DB. 2003. Tropical rain forest tree growth and atmospheric carbon dynamics linked to interannual temperature variation during 1984-2000. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 100 (10): 5852-5857.
- De Castilho WE, Magnusson RNO, De Araujo RCC, Luizao FJ, Luizao APL, Higuchi N. 2006. Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian Forest: Effects of soil and topography. *Forest Ecology and Management*, 234: 85-96.
- De las Salas G. 1978. El ecosistema forestal Carare Opón. Bogotá (Colombia): CONIF. Serie Técnica, # 8.
- De Walt SJ, Chave J. 2004. Structure and biomass of four Neotropical forests. *Biotropica*, 36: 7-19.
- Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K, editors [Internet]. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Japón: Task Force on National Greenhouse Gas Inventories (TFI) of the IPCC-IGES. Fecha de acceso: 08 de noviembre de 2011. Disponible en: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_0_Cover.pdf>.
- Etter A, Mcalpine C, Wilson K, Phinn S, Possingham H. 2006. Regional patterns of agricultural land use and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 114: 369-386.
- Fearnside PM, Laurance WF. 2004. Tropical deforestation and greenhouse-gas emissions. *Ecological Applications*, 14 (4): 982-986.
- Flenley JR. 1996. Problems of the Quaternary on mountains of the Sunda-Sahul region Quart. *Science Review*, 15: 549-555.
- Giraldo W, Corrales A, Yepes A, Duque A. 2010. Caracterización estructural de bosques tropicales a lo largo de un gradiente altitudinal en el departamento de Antioquia. En: Duque A, Callejas R, editores. Informe final proyecto diversidad, dinámica y productividad de los bosques de Antioquia. Medellín (Colombia): Medellín (Colombia). Universidad de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. p. 35-43.
- Gitay H, Suárez A, Watson RT, Dokken DJ, editors. 2002. Cambio climático y biodiversidad. Ginebra (Suiza): Universidad Nacional de Australia, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (Cuba),

- University Corporation for Atmospheric Research y Banco Mundial. p. 85.
- Girardin CAJ, Malhi Y, Mamani M, Huaraca Huasco W, Durand L, Feeley KJ, Rapp J, Silva-Espejo JE, Silman M, Salinas N, Whittaker RJ. 2010. Net primary productivity and its allocation along a tropical forest elevation transect in the Peruvian Andes. *Global Change Biology*, 16 (12): 3176-3192.
- Gutiérrez C. 2008. Etnobotánica de recursos dendroenergéticos en el nordeste antioqueño: una aproximación cuantitativa. [Tesis de Maestría] [Medellín (Colombia)]: Departamento de Ciencias Forestales, Facultad de Ciencias Agropecuarias. p. 65.
- Holdridge LR. 1987. Ecología basada en zonas de vida. San José (Costa Rica): IICA. p. 216.
- Homeier J, Breckle SW, Gunter S, Rollenbeck RT, Leuschner C. 2010. Tree diversity, forest structure and productivity along altitudinal and topographical gradients in a species-rich Ecuadorian montane rain forest. *Biotropica*, 42: 140-148.
- Houghton RA. 2005. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 11: 945-958.
- Houghton RA, Lawrence KL, Hackler JL, Brown, S. 2001. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: a comparison of estimates. *Global Change Biology*, 7: 731-746.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Hayama (Japan): IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land use change and forestry. Hayama (Japan): IPCC National Greenhouse Gases Inventory Programme, Institute for Global Environmental Strategies (IGES).
- IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). 2009. Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia - Bosques 2009. Bogotá (Colombia): Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Laurance W, Fearnside P, Laurance S, Delamonica P, Lovejoy TE, Rankin-De Merona JM, Chambers JQ, Gascon C. 1999. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, 118: 127-138.
- Laurance WF, Oliveira AA, Laurance SG, Condit R, Nascimento HEM, Sánchez-Thorin AC, Lovejoy TE, Andrade A, D'Angelo S, Ribeiro JÊ, Dick CW. 2004. Pervasive alteration of tree communities in undisturbed Amazonian forest. *Nature*, 428: 171-175.
- Leuschner C, Moser G. 2008. Carbon allocation and productivity in tropical mountain forests. En: Gradstein SR, Homeier J, Gansert D, editors. The tropical mountain forest - patterns and processes in a biodiversity hotspot. Göttingen Centre for Biodiversity and Ecology. Biodiversity and Ecology Series, 2: 109-128.
- Leuschner C, Moser G, Bertsch C, Röderstein M, Hertel D. 2007. Large altitudinal increase in tree root/shoot ratio in tropical mountain forests of Ecuador. *Basic and Applied Ecology*, 8: 219-230.
- Malhi Y, Baker TR, Phillips OL, Almeida S, Álvarez E, Arroyo L, Chave J, Czimczik C, Di Fiore A, Higuchi N, Killeen TJ, Laurance SG, Laurance WF, Lewis SL, Mercado-Montoya LM, Monteagudo A, Neill DA, Núñez-Vargas P, Patiño S, Pitman SAC, Quesada CA, Salomao R, Masedo-Silva JN, Torres-Lezama A, Vásquez-Martínez R, Terborgh J, Vinceti B, Lloyd J. 2004. The above-ground coarse wood productivity of 104 Neotropical forest plots. *Global Change Biology*, 10: 563-59.
- Malhi Y, Wood D, Baker TR, Wright J, Phillips OL, Cochrane T, Meir P, Chave J, Almeida S, Arroyo L, Higuchi N, Killeen TJ, Laurance SG, Laurance WF, Lewis SL, Monteagudo A, Neill DA, Núñez-Vargas P, Pitman NCA, Quesada CA, Saloma OR, Silva JNM, Torres-Lezama A, Terborgh J, Vásquez-Martínez R, Vinceti B. 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology*, 12: 1107-1138.
- Nascimento HEM, Laurance WF. 2002. Total aboveground biomass in central Amazonian forest: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management*, 168: 311-321.
- Olander LP, Gibbs HK, Steininger M, Swenson JJ, Murray BC. 2008. Reference scenarios for deforestation and forest degradation in support of REDD: a review of data and methods. *Environmental Research Letters*, 3: 1-11.
- Orrego SA. 2009. Economic modeling of tropical deforestation in Antioquia (Colombia), 1980-2000: An analysis at a semi-fine scale with spatially explicit data. [Tesis de Doctorado] [Oregon State (U. S. A.)]: Department of Forest Engineering, Resources and Management, Oregon State University. p. 120.
- Orrego SA, del Valle JJ. 2003. Existencias y tasas de incremento neto de la biomasa y del carbono en bosques primarios intervenidos y secundarios. En: Orrego SA, del Valle JJ, Moreno FH, editores. Medición de captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín (Colombia). p. 215-242.
- Overman JPM, Witte HJL, Saldarriaga JG. 1994. Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology*, 10: 207-218.
- Phillips OL, Gentry AH. 1994. Increasing turnover through time in tropical forest. *Science*, 263: 954-958.
- Phillips O, Baker T, Arroyo L, Higuchi N, Killeen T, Laurance WF, Lewis SL, Lloyd J, Malhi Y, Monteagudo A, Neill D, Nuñez P, Silva N, Terborgh J, Vásquez R,

- Alexiades M, Almeida S, Brown S, Chave J, Comiskey JA, Czimczik CI, Di Fiore A, Erwin T, Kuebler C, Laurance SG, Nascimento HEM, Olivier J, Palacios W, Patiño S, Pitman N, Quesada CA, Saldias M, Torres A, Vicenti B. 2004. Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976-2001. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 1438: 1-27.
- Phillips JF, Duque AJ, Yepes AP, Cabrera KR, García MC, Navarrete DA, Álvarez E, Cárdenas D. 2011. Estimación de las reservas actuales (2010) de carbono almacenadas en la biomasa aérea en bosques naturales de Colombia: Estratificación, alometría y métodos analíticos. Bogotá (Colombia): Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales-IDEAM, Proyecto "Capacidad Institucional Técnica Científica para apoyar Proyectos REDD: Reducción de Emisiones por Deforestación en Colombia".
- Ramírez JA, Zapata CM, Peláez JD, González MI. 2007. Caída de hojarasca y retorno de nutrientes em bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Interciencia*, 32: 303-311.
- Richards PW. 1996. The tropical rain forest. An ecological study. Oxford (UK): Cambridge University Press. p. 575.
- Rodríguez JLV. 1987. Cuantificación de biomasa e inventario de bioelementos del bosque pluvial tropical de colinas bajas, Bajo Calima, Buenaventura, Colombia. [Tesis de Pregrado] [Ibagué, Colombia]: Facultad de Ingeniería Forestal, Universidad del Tolima. p. 85.
- Rodríguez JLV. 1991. Caracterización de la biomasa aérea y reserva de bioelementos del ecosistema de tierra firme amazónico. Bogotá (Colombia): Fundación Tropenbos. Manuscrito sin publicar.
- Saldarriaga JG, West DC, Tharp ML, Uhl C. 1988. Long term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *Journal of Ecology*, 76: 938-958.
- Saatchi SS, Houghton RA, Dos Santos-Alvala RC, Soares JV, Yu Y. 2007. Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 13: 816-837.
- Sierra CA, Harmon M, Moreno F, Del Valle JI. 2007a. Spatial and temporal variability of net ecosystem production in a tropical forest: testing the hypothesis of a significant carbon sink. *Global Change Biology*, 13: 838-853.
- Sierra CA, Del Valle JI, Orrego SA, Moreno FH, Harmon MA, Zapata M, Colorado GJ, Herrera MA, Lara W, Restrepo DE, Berrouet LM, Loaiza LM, Benjumea JF. 2007b. Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management*, 243: 299-309.
- UNAL y CORNARE. 2002. Modelo de financiación alternativo para el manejo sostenible de los bosques en los valles de San Nicolás: Fase 1. Medellín (Colombia): Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín (UNAL) y Corporación Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare (CORNARE). Documento sin publicar.
- Wang X, Fang J, Tang Z, Zhu B. 2006. Climatic control of primary forest structure and DBH-height allometry in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 234: 264-274.
- Whitmore TC. 1984. Tropical rain forests of the Far East. Oxford (UK): Clarendon Press. p. 282.
- Yepes AP, del Valle JI, Jaramillo SL, Orrego SA. 2010. Recuperación estructural en bosques sucesionales andinos de Porce (Antioquia, Colombia). *Revista de Biología Tropical*, 58 (1): 427-445.
- Zanne AE, López-González G, Coomes DA, Ilic J, Jansen S, Lewis SL, Miller RB, Swenson NG, Wiemann MC, Chave J [Internet]. 2009. Global wood density database. Dryad. Fecha de acceso: 08 de noviembre de 2011. Disponible en: <<http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>>.