



## Secuestro de Carbono en bosques, su papel en el ciclo global

**Markku Kanninen**

CATIE, Turrialba, Costa Rica

### Disminución de recursos y aumento de necesidades

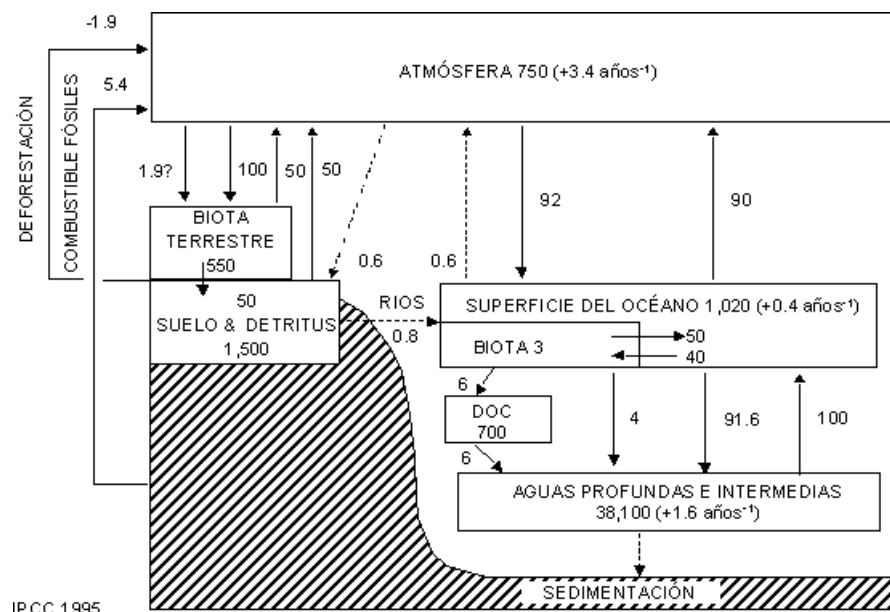
El área total de los bosques del mundo es de aproximadamente 3,4 billones de ha; y un tercio de la superficie terrestre está cubierta con vegetación maderera (FAO, 1995). Una porción considerable del total del área forestal es llamada área maderera abierta, incluyendo las sabanas. La mitad (52 por ciento) de los bosques abiertos y cerrados se encuentra en los trópicos, seguidos de las latitudes altas (30 por ciento) y medias (18 por ciento).

El área mundial de bosques está disminuyendo aproximadamente entre 12 y 15 millones de ha anuales. La mayoría de esta disminución (10 a 12 millones de ha) ocurre en el trópico. De hecho, el área de bosques en las regiones templadas y boreales ha aumentado levemente durante las últimas décadas. Las causas principales de la deforestación en los trópicos son el cambio de tierras agrícolas hacia tierras de pastoreo, y la tala de madera para leña y para construcción.

La investigación en cambio climático y uso de la tierra en los trópicos, se ha enfocado mayormente en el análisis de los impactos de la deforestación y los efectos del uso de la tierra en las emisiones de gases de efecto invernadero y de C. Sin embargo, se han hecho algunos estudios para tratar de cuantificar el potencial del uso sostenible de la tierra para secuestrar y acumular C en los ecosistemas tropicales.

Este documento señala y analiza las opciones para el manejo de C en sistemas forestales y agroforestales en los trópicos. Asimismo, realiza una valoración de la viabilidad de estas formas de manejo del C. Finalmente, se refiere a algunas implicaciones potenciales en las políticas de los países del trópico, como consecuencia de estas opciones.

**Figura 1. El ciclo global del Carbono (Fuente: IPCC, 1995)**



### Rol de los bosques en ciclo global del carbono

Los ecosistemas terrestres y el suelo son depósitos considerables de C (Figura 1 y Cuadro 1). Los bosques del mundo contienen un estimado de 340 Pg de C (1 Pg = 10<sup>15</sup> g) (1 GtC = gigatonelada = billón de tons) en vegetación, y 620 Pg de C en suelo (Brown *et al.*, 1996). Por eso es que los cambios en estos reservorios de C pueden tener un impacto considerable en el balance global de C.

Durante el último siglo, aproximadamente 150 Pg de C han sido liberadas a la atmósfera, como consecuencia de los cambios en el uso del suelo (Cuadro 1). Esto equivale a casi 30 años de emisiones de quema de combustible fósil.

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, siglas en inglés) ha estimado que las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> fueron 5,5 0,5 Pg de C, causadas por la quema del combustible fósil y la producción de cemento, más 1,6 1,0 Pg de C causado por la deforestación (Cuadro 2).

#### CUADRO 1

**Los sumideros y los flujos de Carbono en los ecosistemas terrestres (Houghton, 1996.)**

Ecosistema	1980			Cambio 1850-1980		
	Área Mha	Vegetación Pg C	Suelo Pg C	Área Mha	Vegetación Pg C	Suelo Pg C
Bosque tropical	2 167	288	203	-508	-59	-42
Bosque templado	1 492	127	155	-91	-26	-17
Bosque boreal	1 167	96	237	-4	-6	-3
Bosque total	4 827	510	595	-603	-91	-62
Ecosistemas no forestales	8 900	73	845	+603	+1	+31
Total ecosistemas terrestres	13 727	583	1 440	0	-90	-31

Durante la última década, casi un 45 por ciento de las emisiones antropogénicas han permanecido en la atmósfera, el resto ha sido absorbido por los ecosistemas oceánicos y terrestres. Las emisiones *per capita* varían (Cuadro 3).

La comunidad científica está mayormente de acuerdo, al menos en las bases cualitativas, en que los ecosistemas forestales del trópico han sido fuentes netas de C, y que los bosques templados del norte y boreales son un importante sumidero de C (Kauppi *et al.*, 1992, Sedjo 1992). De cualquier manera, resultados de investigaciones recientes muestran que los bosques tropicales maduros pueden acumular carbono con una tasa de 1-2 Mg/ha/año (Lugo y Brown 1992, Grace *et al.*, 1995), la cual puede desviar las emisiones que producen la deforestación y degradación (Brown *et al.*, 1996) (Cuadro 2).

## El carbono en ecosistemas forestales tropicales

La mayoría de los sumideros de C en la vegetación están localizados en bosques (tropicales) de baja latitud (62 por ciento), mientras que la mayoría del C del suelo está localizado en los bosques de alta latitud (boreal) (54 por ciento).

En los trópicos, el C que está en sumideros superficiales varía entre 60 y 230 ton C/ha en bosques primarios, y entre 25 y 190 ton C/ha en bosques secundarios (Cuadro 4). En bosques tropicales, los sumideros de C en el suelo varían entre 60 y 115 ton C/ha. En otros sistemas de uso del suelo, tales como los agrícolas o ganaderos, los sumideros de C en el suelo son considerablemente pequeños (Cuadro 5).

**CUADRO 2**  
**Balance global (Pg C) del Carbono (IPCC, 1995)**

Fuentes de CO <sub>2</sub>	
(1) Emisiones de Combustible Fósil y Producción de Cemento	5,5 +/- 0,5
(2) Emisiones Netas de Cambios en el Uso del Suelo del Trópico	1,6 +/- 1,0
(3) Total de Emisiones Antropogénicas (1+2)	7,1 +/- 1,1
División entre los Reservorios	
(4) Almacenamiento en la Atmósfera	3,2 +/- 0,2
(5) Asimilación de los Océanos	2,0 +/- 0,8
(6) Asimilación del Bosque del Hemisferio Norte	0,5 +/- 0,5
(7) Pozos Terrestres Adicionales	1,4 +/- 1,5

**CUADRO 3**  
**Emisiones *per capita* (ton) de Carbono (IPCC, 1995)**

Región/País	Origen		Total
	Fósil	Biosfera	
Norteamérica	5,3	0,4	5,7
Latinoamérica	0,6	3,0	3,6
Ex-USSR	3,5	0,1	3,6
S-E Asia	0,5	2,5	3,0
Europa Occidental	2,0	0,1	2,1
China	0,9	0,1	1,0
Africa	0,4	0,1	0,5

Los sistemas agroforestales pueden contener sumideros considerablemente grandes de C no contabilizado en inventarios de reservorios de C en bosques. En algunos casos, los sumideros superficiales de C en sistemas agroforestales son similares a aquellos encontrados en bosques secundarios (Cuadro 6). Asimismo, los sumideros de C en el suelo aumentan en los sistemas agroforestales (Cuadro 5).

**CUADRO 4**  
**Depósitos superficiales de C en bosques tropicales (Brown y Lugo, 1992; Brown *et al.*, 1989)**

Tipo de Bosque	Almacenamiento de Carbono (ton C/ha)	
	Primario	Secundario
Bosque nuboso	230	190
Bosque estacional	140	120
Bosque seco	60	25

**CUADRO 5****Depósitos de carbono en suelos tropicales.**

Uso del Suelo	Almacenamiento de Carbono (ton C/ha)
Bosque Tropical <sup>(1)</sup>	60 - 115
Agricultura (maíz) <sup>(2)</sup>	
- inicial	35
- después de 50 años	9
Agroforestería <sup>(3)</sup>	
- inicial	8,9
- después de 9 años	24,1

**La convención de bosques y clima: objetivos y metas**

El objetivo final de la Convención de Clima es estabilizar las concentraciones de gases de invernadero en la atmósfera a un cierto nivel, lo cual permita: prevenir la interferencia antropogénica peligrosa con el clima; y minimizar los riesgos y los efectos adversos en los ecosistemas.

No se ha definido qué cantidad de gases de invernadero se encuentra o debería estar en la atmósfera y qué tan rápido se alcanzará la meta de estabilización.

Los participantes de la Convención de Cambio Climático están de acuerdo en comprometerse a ciertas acciones para alcanzar el objetivo global de la reunión. En principio, la meta para la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera puede alcanzarse mediante una reducción de las emisiones de dichos gases, reduciendo las fuentes; y removiéndolos aumentando los sumideros.

Para lograr el objetivo global de la Convención de Clima, es de importancia primaria que los ecosistemas forestales del mundo se encuentren en un estado en el que se mantenga e incremente su capacidad de funcionar como sumideros de gases de efecto invernadero. Esto requiere tanto conservación, como manejo sostenible y aumento de sumideros y reservorios.

Se requieren cuatro tipos de acciones generales:

- Medidas en contra de la desertificación, deforestación y destrucción de los bosques. Esto debería apuntar a la estabilización apropiada del área boscosa y, de ser posible a incrementarla.
- Promoción de la salud total de los ecosistemas. Esto incluye especialmente las acciones en contra de los efectos perjudiciales causados por los contaminantes.
- Medidas en contra de la degradación y manejo no sostenible de los ecosistemas; y medidas que aumenten el potencial de los bosques para actuar como sumideros de gases de efecto invernadero (densidades de almacenamiento, cantidad de biomasa, etc.).
- Promoción de la investigación científica, el monitoreo y el intercambio de información en: los bosques, como fuentes y sumideros de gases de efecto invernadero; y un manejo sostenible de los bosques.

**CUADRO 6****Carbono superficial en forestería y agroforestería en Centroamérica.**

Sistemas de especies forestales	Zonas de Vida	Arboles (n/ha)	Edad (años)	Almacenamiento de C (ton/ha)	Flujo de C (ton/ha/yr)
<b>Sombra para café y cacao:</b>					
<i>Cliricidia sepium</i>	HP	330	30	51,6	1,7 <sup>(1)</sup>
<i>Cordia alliodora</i>	HP	278	10	24,9	2,5 <sup>(2)</sup>
<i>Mimosa scarabella</i>	HP	650	2	14,2	7,1 <sup>(3)</sup>
<b>Plantaciones - leña</b>					
<i>L. leucocephala</i>	SB	3800	5	28,9	5,8 <sup>(4)</sup>
<i>Eucalyptus saligna</i>	HP	1378	2,5	27,0	10,8 <sup>(5)</sup>
<b>Arboles en Potrerros</b>					
<i>Alnus acuminata</i>	NB	35	30	25,0	0,8 <sup>(6)</sup>

(1) Salazar 1984, (2) Fassbender et al. 1991, (3) Picado 1986, (4) Martinez, 1989, (5) Salazar 1986, (6) Canet, 1986

HP = bosque tropical húmedo premontano, SB = bosque tropical seco bajo, NB = bosque tropical nuboso bajo. (Kurstén y Burschell, 1993)

Los bosques pueden ser fuentes así como sumideros de gases de efecto invernadero. Los ecosistemas forestales también son un reservorio considerable de C. Contienen más del 80 por ciento del C global de las superficies. Sin embargo, las acciones que incluyen bosques están relacionadas con estas tres categorías: fuentes, sumideros y reservorios.

No obstante, debe considerarse que en relación con el objetivo global de la convención, estos programas que involucran al sector forestal pueden tener muchos objetivos paralelos. Por ejemplo, la eliminación mayor de

gases de efecto invernadero de la atmósfera, mediante el incremento de sumideros, puede considerarse una meta a corto plazo.

Cuando los bosques están maduros no ocurre asimilación neta de C, ya que el ecosistema boscoso está saturado con este elemento. Por otro lado, los árboles y su energía biomásica pueden usarse como sustitutos de los combustibles fósiles. Esta es una meta a largo plazo debido al hecho de que cuando se queman los árboles, se libera C a la atmósfera; pero es C "reciclado", y no se agrega C nuevo (fósil) al sistema.

Finalmente, el objetivo principal de los programas de aforestación y reforestación es usualmente la producción de bienes y servicios (madera para leña, material crudo, control de la erosión, etc.), y el secuestro de C puede considerarse sólo un beneficio adicional (a corto plazo) para esos programas.

## Manejo de carbono: aumento y mantenimiento de sumideros

En principio, el sumidero de C de cualquier ecosistema terrestre tiene dos componentes principales: el área total de esos ecosistemas, y la densidad de C por unidad de área. No obstante, para aumentar y mantener los sumideros de C, podemos desarrollar acciones para incrementar el área de estos ecosistemas, aumentar su densidad de C o realizar estas dos acciones simultáneamente.

Hay varios estudios que tratan de estimar el área potencial disponible para la reforestación, agroforestería, conservación u otras opciones de manejo para el secuestro de C (Houghton *et al.*, 1991, Winjum *et al.*, 1993, Nilsson y Schophauser, 1995) (Cuadro 2). Sin embargo, hay varias regulaciones relacionadas con estas acciones. La disponibilidad real de tierra para estos programas depende de factores económicos, sociales, culturales e institucionales, que influyen en el uso del suelo (Trexler y Haugen, 1995, Godoy *et al.*, 1998).

El manejo sostenible de los sumideros de C en los bosques existentes, en los sistemas agroforestales y en las tierras agrícolas ofrece una opción interesante. El C superficial de los ecosistemas forestales tropicales varía entre 25 y 250 ton/ha (Cuadro 4). No obstante, la reducción de la deforestación y el incremento de las medidas para la protección de bosques ofrecen una manera efectiva en cuanto a costo, para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Otras opciones de manejo de carbono relacionadas con los ecosistemas existentes y con los sistemas de producción, incluyen la incorporación de árboles a los sistemas agrícolas, ya sea como sistemas agroforestales o silvopastoriles. El contenido de C superficial de estos sistemas varía entre 10 y 70 ton/ha, y el flujo anual de C al sistema está entre 1-10 ton/ha/año (Cuadro 6). Cuando se considera el C almacenado en el suelo de estos sistemas, las cifras anteriores pueden multiplicarse por el factor 2.

Houghton *et al.* (1991) estima que entre 300 y 1 900 millones de ha de tierra estarán disponibles globalmente para el secuestro de C. Brown *et al.* (1996) sugieren que 700 Mha globales de tierra podrían estar disponibles para programas de conservación y secuestro de C: 245 Mha para plantaciones y agroforestería, 138 Mha para deforestación tropical lenta y 217 Mha para regeneración natural y asistida de bosques tropicales.

La cantidad de tierra referida puede conservar y secuestrar entre 60 y 87 Pg C en el 2050. De forma global, la forestación y agroforestería abarca la mitad del total (38 Pg C), y aproximadamente el 20 por ciento de éste está acumulado en el suelo.

La cantidad de C que podrá conservarse y secuestrarse por el sector forestal para el año 2050 es equivalente a entre un 11 y un 15 por ciento del total de las emisiones de combustible fósil durante el mismo período de tiempo.

El costo por unidad de reducir las emisiones de C, disminuyendo la deforestación y protegiendo los bosques tiende a ser bajo. Oscila entre menos de 1 hasta 15 dólares/Mg C. Los costos por unidad para esta práctica son bajos porque la densidad de C de las áreas boscosas tiende a ser relativamente alta (Cuadro 7).

Varios estudios conducidos en países en desarrollo evaluaron el costo del secuestro de C usando opciones que iban desde la agroforestería, plantaciones de rotación larga y corta, regeneración natural, manejo forestal y prácticas silvoculturales (Brown *et al.*, 1996). El costo por unidad de reducir las emisiones de C mediante estas actividades oscila entre 2 y casi 30 dólares/Mg C (Cuadro 7).

**CUADRO 7**  
**Costos de la conservación y secuestro de Carbono.**

Franja latitudinal	Opción Forestal	Costo (US\$/Mg C)	Costo total (US\$ billones)
Alta	Plantaciones	8	17
Media	Plantaciones	6	60
	Agroforestería	5	3
Baja	Deforestación lenta	2	44-99
	Plantaciones	7	97
	Agroforestería	5	27
Total		3,7 - 4,6	247 - 302

Fuente: Brown *et al.*, 1996.

Las opciones para la conservación y secuestro de C en los bosques del mundo están resumidas en el Cuadro 8. La adopción de estas alternativas depende, en cada caso, de la situación local y del marco global de las políticas. Las opciones de bajo costo a través de la reducción de la deforestación y la protección, la silvicultura y la sustitución de productos, son viables a corto plazo. Otras medidas podrían requerir más investigación y estudios sobre su viabilidad.

**CUADRO 8****Resumen de las opciones para el manejo de Carbono.**

Opción	Densidad de Carbono	Secuestro (Corto plazo)	Costo de C
Reducir deforestación y protección de bosques	Alta	Bajo	Bajo
Reforestación	Moderada	Alto	Moderado
Silvicultura	Alta	Moderado	Bajo
Agroforestería	Baja	Moderado	Moderado
Plantaciones de Madera para Leña	Moderada	Alto	Alto
Productos Forestales	Baja	Bajo	Bajo

**Conclusiones**

El manejo forestal y de los ecosistemas no puede resolver, por sí solo, el problema del calentamiento global. Las emisiones, junto con la deforestación de los trópicos y otros cambios en el uso del suelo, compensan sólo una pequeña porción de las emisiones provenientes de la quema de combustible fósil. No obstante, el manejo de C, junto con otras medidas en los ecosistemas tropicales pueden ser actores en el plan global. Sin embargo, es difícil cuantificar su contribución.

Asimismo, debe notarse que el manejo de los ecosistemas tropicales puede tener otras funciones y metas aparte de resolver el problema del calentamiento global. Para una gran mayoría de las personas de los países en desarrollo, los árboles son la principal fuente de energía. La tierra de bosques es sustituida por la agricultura, para la producción de alimentos para una población constantemente creciente. Están surgiendo nuevos retos para el manejo sostenible de los bosques. Sin embargo, esto no implica que no se pueda hacer algo. El desarrollo de herramientas que permitan la combinación de estos múltiples objetivos, parece ser la meta mínima a la que se aspira.

**Bibliografía**

**Brown, S. y Lugo, A.** 1992. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17.

**Brown, S.; Gillespie, A.J.R. y Lugo, A.E.** 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35.

**Brown, S.; Sathaye, J.; Cannel, M. y Kauppi, P.E.** 1996. Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *Commonwealth Forestry Review* 75.

**Canet, B. G.** 1986. Características del sistema silvopastoral jaul (*Alnus acuminata*) con lechería de altura en Costa Rica. En *Símpoio sobre técnicas de producción de leña en fincas pequeñas y recuperación de sitios degradados por medio de silvicultura intensiva*. Costa Rica

**FAO.** 1995. *Forest resources assessment 1990: Global synthesis*. Documento No. 124. FAO, Roma, Italia.

**Fassbender, H.W.; Beer, J.; Heuvelink, J.; Imbach, A.; Enriquez, G. y Bonnemann, A.** 1991. Ten year balances of organic matter and nutrients in agroforestry systems at CATIE, Costa Rica. *Forest Ecology and Management* 45.

**Godoy, J.C.; Kanninen, M.; Ramírez, O. y Gómez, M.** 1998. Análisis económico y financiero de los incentivos a la reforestación implementados en Costa Rica. En *El Manejo Sustentable de los Recursos Forestales, Desafío del Siglo XXI*. Actas Primer Congreso Latinoamericano IUFRO, Chile.

**Grace, J.; Lloyd, J.; McIntyre, J.; Miranda, A.C.; Meir, P.; Miranda, H.S.; Nobre, C.; Moncrieff, J.; Massheder, J.; Malhi, Y.; Wright, I. y Gash, J.** 1995. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993. *Science* 270.

**Houghton, R.A.** 1996. Land-use change and terrestrial carbon: the temporal record. En *Forest Ecosystems, Forest Management, and the Global Carbon Cycle*. NATO ASI Series, Serie I: Global Environmental Change, 40. Alemania.

**Houghton, R.A.; Skole, D.L. y Lefkowitz, D.S.** 1991. Changes in landscape of Latin America between 1850 and 1985, 2: Net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere. *Forest Ecology and Management* 38.

**IPCC.** 1995. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, U.K.

**Kauppi, P. E.; Mielikäinen, K. y Kuusela, K.** 1992. Biomass and Carbon Budget of European Forests, 1971 to 1990. *Science* 256.

**Kuersten, E. y Burschel, P.** 1993. CO<sub>2</sub>-mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution* 70.

**Lugo, A. y Brown, S.** 1992. Tropical forests as sinks of atmospheric carbon. *Forest Ecology and Management* 48.

**Martínez, H.H.A.** 1989. El componente forestal en los sistemas de finca de pequeños agricultores. CATIE. Serie Técnica, Boletín Técnico No. 19. Turrialba, Costa Rica.

**Nilsson, S. y Schophauser, W.** 1995. The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. *Climatic Change* 30.

**Picado, V.W.** 1986. *Mimosa scrabella*, especie con potencial para sombra y producción de leña en cafetales de Costa Rica. En: *Simposio sobre técnicas de producción de leña en fincas pequeñas y recuperación de sitios degradados por medio de silvicultura intensiva*. Costa Rica.

**Salazar, R.** 1984. Producción de leña en árboles de *Gliricidia sepium* usado como sombra en cafetales de Costa Rica. *Silvoenergía* 2. CATIE, Costa Rica.

**Salazar, R.** 1986. *Simposio sobre técnicas de producción de leña en fincas pequeñas y recuperación de sitios degradados por medio de silvicultura intensiva*. Costa Rica.

**Sedjo, R.** 1992. Temperate Forest Ecosystems in the Global Carbon Cycle. *Ambio*. 24.

**Trexler, M.C. y Haugen, C.** 1995. *Keeping it green: evaluating tropical forestry strategies to mitigate global warming*. World Resources Institute. EE.UU.

**UN-ECE/FAO.** 1992. *The forest resources of the temperate zones. Main findings of the UN-ECE/FAO 1990 Forest Resource Assessment*. ECE/TIM-60. EE.UU.

**Winjum, J.K.; Dixon, R.K. y Schroeder, P.E.** 1993. Forest management and carbon storage: an analysis of 12 key forest nations. *Water, Air and Soil Pollution* 70.

**Young, A.** 1989. *Agroforestry for soil conservation. ICRAF Science and Practice in Agroforestry* 4. CAB International, Wallingford. 1989.

