

¿Cómo hacerlo?

¿Cómo monitorear el secuestro de carbono en los sistemas silvopastoriles?

Hernán J. Andrade¹; Muhammad Ibrahim²

Palabras claves: cambio global; carbono orgánico de suelos; fijación de carbono; modelos de biomasa.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es uno de los principales problemas que enfrenta el mundo de hoy. Algunas manifestaciones de dicho cambio son un incremento de cerca de medio grado centígrado desde el siglo pasado (Ciesla 1996) y cambios en los regímenes hídricos. La concentración de gases de invernadero —dióxido de carbono (CO₂), metano y óxidos nitrosos— en la atmósfera ha aumentado considerablemente, lo cual fortalece el efecto invernadero, con el consecuente sobrecalentamiento del planeta. El CO₂, principal gas de efecto invernadero, incrementó su concentración de 280 ppm en 1750 a 360 ppm en el 2000, y el uso de combustibles fósiles genera en la actualidad del 80 al 85% del CO₂ emitido (Gómez-Echeverri 2000). Los sistemas ganaderos tradicionales han sido culpados de aportar grandes cantidades de metano a la atmósfera, debido al proceso digestivo de los bovinos y otros rumiantes (Ciesla 1996). Adicionalmente, la degradación de pasturas contribuye de manera significativa al aumento del CO₂ atmosférico, ya que en estos sistemas hay una rápida descomposición del carbono de la materia orgánica y, por ende, mayor emisión (Houghton *et al.* 1991).

Los gases de invernadero podrían reducirse a través de dos procesos: reducción de emisiones antropogénicas de CO₂ o creación y/o mejoramiento de los sumideros de carbono en la biosfera. La forestería puede contribuir a la mitigación del calentamiento global mediante la conservación, el secuestro y almacenamiento y la sustitución de carbono (Vine *et al.* 1999, IPCC 2000). De igual manera, los sistemas agroforestales podrían remover

cantidades significativas de carbono de la atmósfera, ya que las especies arbóreas pueden retener carbono por un tiempo prolongado, principalmente en su madera. Algunos autores consideran que estos sistemas podrían acumular entre 1,1 y 2,2 Pg³ en los próximos 50 años en todo el mundo (Albrecht y Kandji 2003). Sin embargo, la cantidad de investigación realizada en agroforestería es poca en comparación con la de otros usos de la tierra, como bosques y plantaciones forestales, y aún falta conocer mejor el potencial de estos sistemas para secuestrar carbono.

Los sistemas silvopastoriles podrían recibir pagos por ser mitigadores del calentamiento global y por otros servicios ambientales. El monitoreo del secuestro de carbono es una herramienta fundamental en los proyectos de mitigación. El diseño del inventario debe considerar el equilibrio costo-beneficio, con el fin de lograr un balance entre la precisión y los recursos disponibles (MacDicken 1997). El objetivo de este documento es proponer una metodología para cuantificar el almacenamiento y la fijación de carbono en sistemas silvopastoriles, que esté al alcance de muchos proyectos.

MONITOREO DEL SECUESTRO DE CARBONO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

El impacto de cualquier proyecto de secuestro de carbono debe estimar la diferencia del carbono almacenado en sitios con proyecto y sin él (línea de base) en un tiempo determinado (Ecuación 1). En proyectos agroforestales, el caso de referencia es el sistema existente de uso de la tierra (Powell y Delaney 1998).

¹ Candidato Doctoral en Agroforestería. CATIE-Universidad de Gales (Bangor). Correo electrónico: handrade@catie.ac.cr (autor para correspondencia).

² Departamento de Agricultura y Agroforestería, CATIE, Sede Central. Correo electrónico: mibrahim@catie.ac.cr

³ 1 Pg = 10¹⁵ g

Ecuación 1. Estimación de la fijación de carbono en proyectos de uso de la tierra y forestería.

$$FC = \frac{AC_p - AC_{lb}}{t}$$

Donde:

- FC: fijación de carbono por el proyecto (t C ha⁻¹ año⁻¹)
- AC_p: almacenamiento de carbono por el proyecto (t C ha⁻¹)
- AC_{lb}: almacenamiento de carbono en la línea de base (t C ha⁻¹)
- t: edad del proyecto (años)

Los inventarios de carbono son una fotografía del estado actual de cada componente de carbono (biomasa, hojarasca, suelos, raíces) en términos de cantidad. Esta metodología debería permitir la comparación entre sitios, sistemas y períodos (MacDiken 1997) y dependerá de la relación costo-beneficio. Esta relación considera los ingresos generados por los créditos de carbono y los costos del monitoreo, siendo importante que los costos estén en relación con los beneficios por obtener. En general, existen tres niveles de esfuerzo con relación al ba-

lance costo-beneficio: (1) básico: de menor costo y exactitud (30% de error), donde las mediciones se hacen solo al inicio y al final del proyecto; (2) moderado: provee una exactitud mayor (20% de error) y es monitoreado cada dos o tres años y al final, y (3) alto: produce estimados más precisos (10-15% de error), y se mide anualmente (MacDiken 1997). El diseño del monitoreo también depende de las tasas de fijación de carbono. En sistemas con tasas bajas es aconsejable reducir la frecuencia de monitoreo, ya que el error podría ser igual o mayor a dichas tasas, reduciendo la confiabilidad de los estimados.

INVENTARIOS DE CARBONO

La gran variabilidad espacial de los sistemas silvopastoriles hace que los muestreos estratificados sean los más convenientes. El sistema total debe ser dividido en estratos (vegetación, suelo o topografía), los cuales se pueden definir empleando imágenes satelitales, fotografías aéreas, y mapas de vegetación, suelos o topografía (MacDiken 1997). La metodología sugerida en este documento comprende un conjunto de métodos para evaluar cada componente de los sistemas silvopastoriles: biomasa herbácea, biomasa leñosa, suelo y hojarasca (Figura 1).

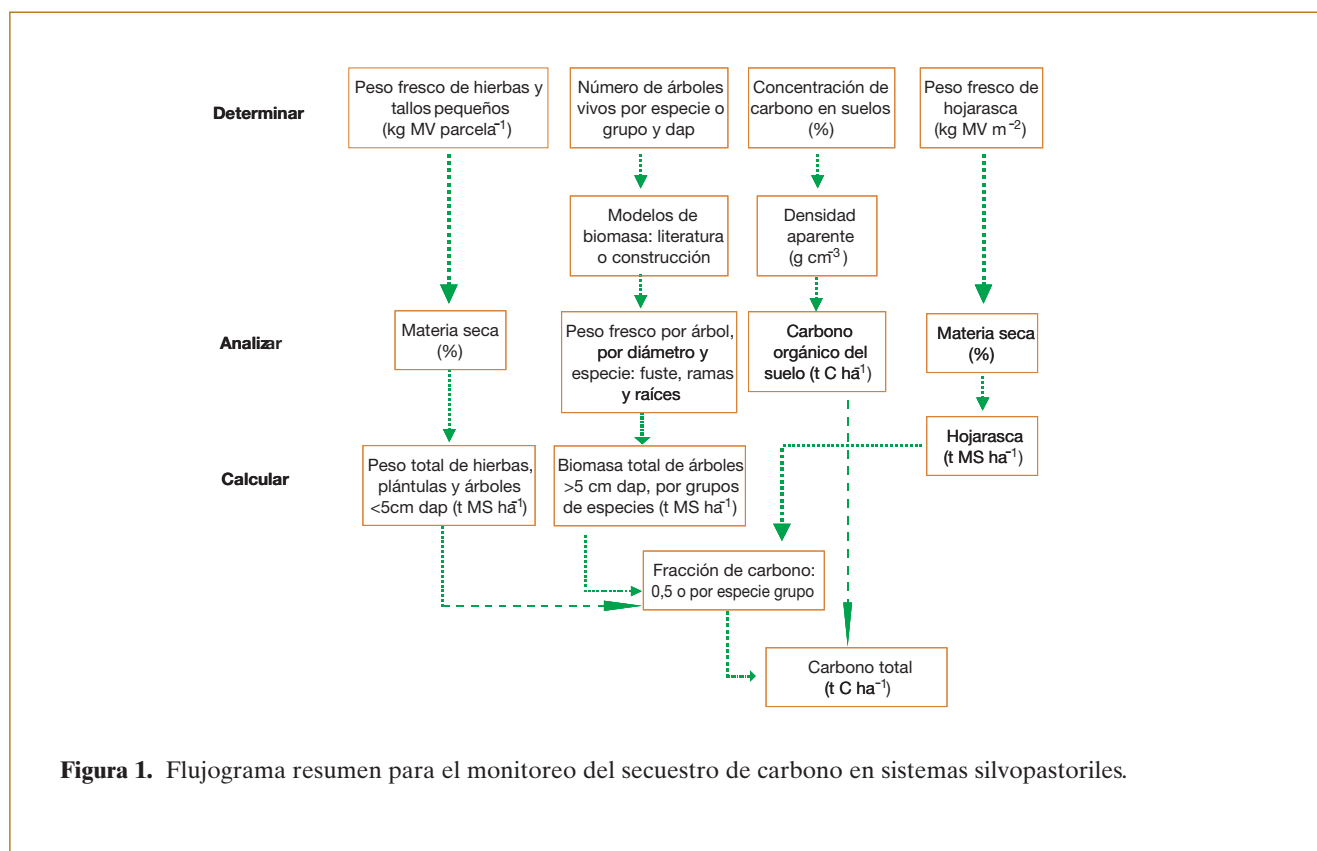


Figura 1. Flujograma resumen para el monitoreo del secuestro de carbono en sistemas silvopastoriles.

En el monitoreo del secuestro de carbono en ecosistemas forestales, las parcelas permanentes de muestreo (PPM) son una herramienta estadística importante para evaluar los cambios temporales, principalmente porque proveen datos más reales y fácilmente verificables del crecimiento de la vegetación (MacDiken 1997). Los cambios temporales de almacenamiento de carbono en las PPM pueden ser considerados como flujos de carbono.

Las características de las PPM (forma, tamaño y número) constituyen un aspecto clave del monitoreo. La forma de las parcelas depende enteramente de la distribución espacial de los árboles. En plantaciones lineales, se debería usar parcelas con la misma forma; mientras que si los árboles se distribuyen al azar (dispersos), la forma más aconsejable es la circular o bien, realizar un censo, ya que cuando hay pocos árboles esta acción puede reducir el error del muestreo. En sistemas con árboles de distribución sistemática, se recomiendan las PPM rectangulares (Figura 2). Con esta selección de formas se asegura que la densidad arbórea de la PPM sea igual a la densidad encontrada en el sistema por evaluar. La densidad arbórea determina el tamaño de las PPM, de tal manera que, en sistemas muy densos, es posible trabajar con parcelas pequeñas, mientras que en sistemas de baja densidad es indispensable emplear parcelas grandes (Cuadro 1).

El número de PPM depende de su tamaño, de la intensidad del muestreo y del tamaño del sistema y/o estrato (Ecuación 2). Se debe determinar el tamaño de la muestra o número de PPM para cada estrato, ya que en inventarios de carbono cada componente presenta una variancia diferente. Otra opción en la determinación del tamaño de la muestra, que goza de mayor validez estadística, incluye un premuestreo de cada componente por evaluar (Ecuación 3; Segura y Kanninen 2002). Es recomendable incrementar en un 10 a 20% el número

calculado de PPM, a fin de eliminar el problema de pérdida de parcelas y asegurar que siempre se cuente con un número adecuado para la medición (MacDiken 1997).

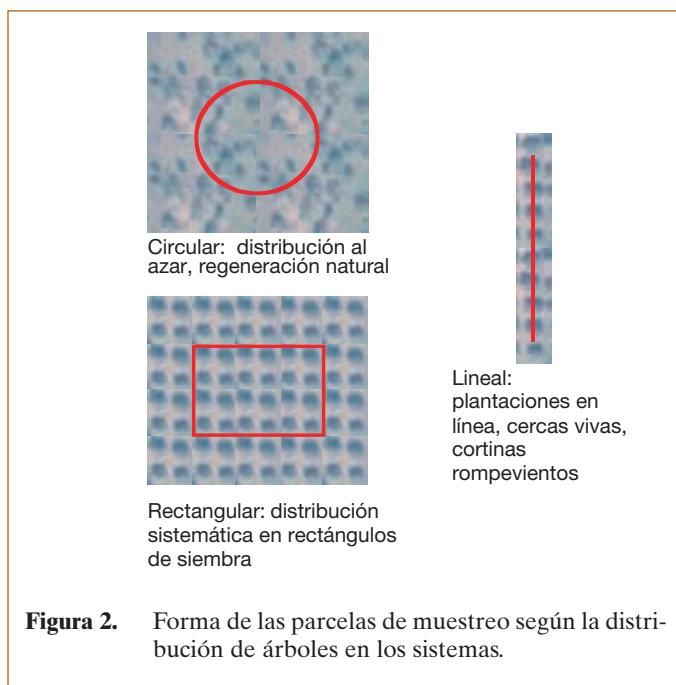


Figura 2. Forma de las parcelas de muestreo según la distribución de árboles en los sistemas.

Ecuación 2. Estimación del número de parcelas de muestreo con base en la intensidad de muestreo deseada.

$$n = \frac{IM \times At}{Ap \times 100}$$

Donde:

- n*: número de PPM (parcelas permanentes de muestreo)
- IM*: intensidad de muestreo (%)
- At*: área total del sistema o estrato (m²)
- Ap*: área de la PPM (m²)

Cuadro 1. Tamaño de parcelas para inventarios de carbono.

Densidad arbórea (# árboles ha ⁻¹)	Tamaño parcela (m ²)	Aplicación	Ejemplos de sistemas silvopastoriles
< 100	1000	Vegetación leñosa muy esparcida	Árboles dispersos en potreros
100 - 140	670	Vegetación leñosa esparcida	
140 - 250	500	Vegetación leñosa moderadamente esparcida	Pastoreo en plantaciones forestales, bancos forrajeros, pasturas en callejones
250 - 670	250	Vegetación leñosa moderadamente densa	
>700	100	Vegetación muy densa, rodales con gran número de tallos de diámetros pequeños, distribución uniforme de tallos grandes	

Fuente: Adaptado de MacDicken (1997).

Por ejemplo, si se tiene un sistema silvopastoril de 7 ha, con alrededor de 200 árboles ha⁻¹, y se desea obtener una intensidad de muestreo del 5% con parcelas circulares de 500 m², se tendría lo siguiente: $n = 5 \times 70000 \text{ m}^2 / (500 \text{ m}^2 \times 100)$; así, $n = 7$ parcelas de muestreo.

Ecuación 3. Estimación del número de parcelas de muestreo con base en un premuestreo.

$$n = \left[\frac{t \times s}{\left(\frac{S_{yx} \times \chi}{100} \right)} \right]^2$$

Donde:

- n : número de PPM (parcelas permanentes de muestreo)
 S_{yx} : error de la estimación (%)
 t : valor de la t de Student, de acuerdo con el tamaño de la muestra y la probabilidad deseada
 s : variancia
 χ : media

La periodicidad o frecuencia de la medición de las PPM dependerá del componente de carbono por evaluar, ya que los componentes del sistema tienen diferentes tasas de cambio (flujo). Se recomienda hacer monitoreos anuales en componentes con tasa alta, tales como la biomasa aérea. En suelos, el monitoreo puede hacerse menos frecuentemente, ya que es muy costoso y en áreas no perturbadas la cantidad de carbono no cambia dramáticamente con el tiempo (Vine *et al.* 1999). El efecto de la estacionalidad puede controlarse realizando todos los inventarios en la misma época, preferiblemente en el mismo mes (MacDiken 1997).

COMPONENTES DEL ALMACENAMIENTO DE CARBONO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES

Los sistemas forestales y agroforestales acumulan carbono en cuatro componentes: biomasa sobre el suelo, hojarasca, sistemas radiculares y carbono orgánico del suelo (Snowdon *et al.* 2001). En general, todos los componentes grandes y que cambian sustancialmente durante la vida del proyecto deberían ser medidos; sin embargo, es necesario enfatizar en aquellos que almacenan el carbono con mayor permanencia, como la biomasa leñosa.

Biomasa sobre el suelo

La biomasa sobre el suelo en sistemas silvopastoriles se divide principalmente en (1) biomasa leñosa y (2) biomasa del estrato herbáceo: pastos, leguminosas, hierbas, estados juveniles y otros (Snowdon *et al.* 2001).

1) Biomasa de los componentes leñosos. Los métodos más usados para estimar esta biomasa son: (a) uso de modelos de biomasa por especie; (b) aplicación de modelos generales de biomasa; (c) construcción de tablas de biomasa generales o por especie; (d) uso de tablas de rendimiento estándar de madera (Snowdon *et al.* 2001), y (e) uso de la técnica del árbol promedio (MacDiken 1997). En todas estas situaciones, se debe medir el diámetro a la altura del pecho (dap) y la altura total de la vegetación leñosa (dap >2 cm) en las PPM (MacDiken 1997).

a) Uso de modelos de biomasa por especie. Se estima la biomasa total aérea por individuo con base en el dap y la altura total. Lo más aconsejable es emplear modelos que hayan sido construidos bajo condiciones similares a las encontradas donde se quieran aplicar, principalmente en términos de tamaño de árboles y densidad arbórea. Algunos autores han desarrollado modelos de biomasa para su uso en sistemas silvopastoriles de los trópicos seco y húmedo (Cuadro 2). En este caso, las medidas necesarias son el dap y la altura total del árbol.

b) Uso de modelos generales. Se han desarrollado algunos modelos muy generales como herramienta para estimar el contenido de biomasa aérea en inventarios forestales (Brown *et al.* 1989). Aunque estos modelos pueden presentar grandes limitaciones, podrían usarse en el caso de no existir modelos específicos para zonas o condiciones particulares (Cuadro 3). El uso de dichos modelos generales requiere de las mediciones del dap, aunadas en algunos casos a la altura total del árbol y la densidad de la madera.

c) Construcción de modelos o tablas de biomasa por especie. En caso de no encontrar modelos por especie, es posible desarrollarlos (Segura y Kanninen 2002). Los modelos de biomasa son ecuaciones matemáticas que relacionan la biomasa con dimensiones de árboles en pie (dap, altura comercial y total, crecimiento diamétrico, etc.) (Ortiz 1993, Brown 1997, Araújo *et al.* 1999). Estos modelos de biomasa pueden ser construidos mediante un muestreo destructivo, usando un mínimo de 30 árboles bien seleccionados (MacDiken 1997).

En general, la construcción de modelos de biomasa consiste en la medición de árboles en pie y la posterior corta y cuantificación de su biomasa aérea total. El árbol se divide en componentes: fuste, ramas grandes, ramas pequeñas y hojas. Las ramas pequeñas (diámetro <25 cm)

Cuadro 2. Algunos modelos de biomasa para la estimación de biomasa aérea total de árboles en sistemas silvopastoriles.

Modelo	Especies arbóreas	R ²	Precipitación (mm año ⁻¹)	Fuente
LB = -2,2 + 0,08D - 6,2 x 10 ⁻⁴ D ²	<i>Cassia grandis</i> , <i>Platymiscium pleiostachyum</i> , <i>Pithecellobium saman</i> , <i>Guazuma ulmifolia</i> , <i>Enterolobium cyclocarpum</i> , <i>Cordia alliodora</i> y <i>Tabebuia rosea</i>	0,94	1200 - 1800	Ruiz 2002
B = 3,44 + 0,064D + 1,03H	<i>Acacia mangium</i>	0,99	4500	Andrade 1999
B = 4,24 + 0,052D + 1,05H	<i>Eucalyptus deglupta</i>	0,99	4500	Andrade 1999

LB: logaritmo de la biomasa total aérea (t MS árbol⁻¹); B: biomasa total aérea (kg MS árbol⁻¹); D: diámetro a la altura del pecho (1,3 m) (cm); H: altura total del árbol (m).

Cuadro 3. Modelos alométricos para estimar la biomasa sobre el suelo del componente leñoso con datos de inventarios forestales.

Tipo de clima basado en precipitación anual	Ecuación	R ² ajustado
Seco (< 1500 mm año ⁻¹)	y = 34,4703 - 8,0671 D + 0,6589 D ²	0,67
Húmedo (150 - 4000 mm año ⁻¹)	y = 38,4908 - 11,7883 D + 1,1926 D ²	0,78
	y = exp [-3,1141 + 0,9719 ln(D ² H)]	0,97
	y = exp [-2,4090 + 0,9522 ln(D ² HS)]	0,99
Lluvioso (> 4000 mm año ⁻¹)	y = 13,2579 - 4,8945 D	0,90
	y = exp [-3,3012 + 0,9439 ln(D ² H)]	0,90

Fuente: Brown *et al.* (1989).

y : biomasa sobre el suelo (kg MS árbol⁻¹); H: altura (m); D: diámetro a la altura del pecho (1,3 m) (cm); S : densidad de la madera (t m⁻³).

y hojas pueden ser pesadas en fresco y transformadas a valores de biomasa tomando una muestra y secándola en el horno (70 °C hasta peso constante). El fuste y las ramas grandes (diámetro ≥25 cm) se cubican (determinación de su volumen por medio de ecuaciones de Smalian, Huber, etc.) y se transforman a biomasa por medio de su gravedad específica.

d) *Uso de tablas de rendimiento estándar.* Las tablas de rendimiento estándar estiman el volumen de árboles en pie con algunas de sus dimensiones (dap, altura total). Posteriormente, con ayuda de la gravedad específica y el factor de expansión de biomasa (relación entre biomasa total y biomasa de fuste), puede estimarse la biomasa aérea total (Ecuación 4).

Ecuación 4. Estimación de la biomasa aérea total de árboles con base en su volumen comercial de fuste.

$$B_{ta} = V_f \times GE \times FEB$$

Donde:

B_{ta}: biomasa aérea total (t MS árbol⁻¹)

V_f: volumen de fuste (m³ árbol⁻¹)

GE: gravedad específica o densidad básica de la madera (t m⁻³)

FEB: factor de expansión de biomasa

Los valores promedio de gravedad específica —peso por unidad de volumen— pueden ser encontrados en la literatura o determinados mediante un análisis de laboratorio. El peso de las muestras secas (70 °C por 72 horas) es de fácil estimación. El cálculo del volumen se puede realizar por medio de dos métodos generales: (1) tomando piezas de madera de forma regular (ej. un cubo) de dimensiones conocidas (Vine *et al.* 1999), o (2) cubriendo las muestras de parafina e introduciéndolas en un recipiente con agua para determinar su volumen por desplazamiento de agua (principio de Arquímedes).

El factor de expansión de biomasa (FEB) —la relación entre la biomasa total aérea y la biomasa comercial— varía mucho entre especies y condiciones particulares de los ecosistemas forestales. El valor más comúnmente

empleado es 1,6 (Dixon 1995); sin embargo, en sistemas agroforestales, se pueden encontrar valores promedios de 2,2 con un rango de 1,9 a 2,4. Ruiz (2002) encontró valores promedio de FEB de 1,6 para siete especies arbóreas dispersas en pasturas de Matiguás, Nicaragua (*Cassia grandis*, *Platymiscium pleiostachyum*, *Pithecellobium saman*, *Guazuma ulmifolia*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Cordia alliodora* y *Tabebuia rosea*).

e) *La técnica del árbol promedio*. Esta técnica puede ser una opción más económica que los métodos alométricos. El concepto es que un árbol de tamaño promedio tendrá también una biomasa promedio; para esto, el área basal tiende a ser un buen indicador de la biomasa total. Los árboles seleccionados se cortan y se cuantifica su biomasa, y se multiplica el peso del árbol promedio por la densidad de árboles del sistema para obtener un estimado de la biomasa total. Pueden incluirse algunas modificaciones, tales como un muestreo estratificado, el método de la relación de área basal o la utilización de valores de promedio ponderado (MacDiken 1997). El número de árboles por cortar depende del número de estratos del sistema.

2) Biomasa herbácea. La pastura es el principal componente herbáceo de los sistemas silvopastoriles. El método de muestreo en estos sistemas depende básicamente de la distribución de árboles en la pastura: árboles dispersos o en callejones. Los muestreos deben capturar toda la variabilidad en la biomasa herbácea, lo cual se logra localizando los puntos de muestreo a diferentes distancias de los árboles en el caso de los árboles dispersos (López *et al.* 1999), o en diferentes franjas respecto a la línea de árboles en sistemas silvopastoriles en callejones (Velasco *et al.* 1999, Andrade 1999).

La biomasa herbácea puede cuantificarse mediante marcos de muestreo (50 x 50 cm). Se ubica el marco en los sitios de muestreo, se corta todo el material herbáceo que se encuentre dentro de él y se pesa en fresco, tomando una submuestra de alrededor de 200 g para determinar el contenido de materia seca en el laboratorio. Es posible emplear una adaptación de este método —llamado de doble muestreo—, consistente en un muestreo real y otro visual. Se trata de la construcción de una regresión entre estimaciones visuales —1 (bajo) a 5 (alto)— de la biomasa y la biomasa real en varios puntos de muestreo. Al final, se realiza una evaluación visual de la cantidad de biomasa por punto, se promedia para todo el sistema y se estima su biomasa con base en la regresión construida. El método de do-

ble muestreo ofrece la ventaja de disminuir el número de muestras, abarcando una mayor área; sin embargo, se disminuye la precisión de la estimación.

Biomasa bajo el suelo

Los sistemas radiculares representan la biomasa bajo el suelo y constituyen otro sumidero de carbono. En proyectos de fijación de carbono este componente es importante, ya que corresponde a entre un 10 y un 40% de la biomasa total (MacDiken 1997). La biomasa de las raíces puede estimarse básicamente por dos procedimientos: (1) medición directa y (2) uso de modelos.

1) Medición directa de biomasa de raíces. Esta técnica demanda muchos recursos y arroja, por lo general, niveles moderados de precisión, debido a la amplia variabilidad en la distribución de las raíces en el suelo (MacDiken 1997). Aunque la mayor proporción de biomasa bajo el suelo se encuentra en las raíces estructurales, la mayoría de los protocolos de monitoreo considera solo las raíces finas ($d < 2$ mm), ya que son las más dinámicas (MacDiken 1997, Snowdon *et al.* 2001). Esto se debe a que la estimación de la biomasa de raíces estructurales se realiza por medios destructivos (Böhm 1979).

El método más usado es el de muestreo con barreno de golpe, el cual consiste en la toma de muestras de suelo con un barreno de volumen conocido (cilindro de 8 cm de diámetro por 25 cm de longitud). Posteriormente, se deben separar las raíces del suelo y por especies y estimar su biomasa. Es importante realizar una estratificación del suelo según la profundidad, ya que, generalmente, la mayor densidad de raíces finas se encuentra en los horizontes superficiales del suelo.

2) Uso de modelos o relaciones de biomasa de raíces. Debido a los costos elevados del muestreo de raíces, en algunos proyectos podría ser mejor estimar su biomasa usando modelos; no obstante, la literatura sobre este tema es escasa. Algunos valores de biomasa en bosques tropicales sugieren que la relación biomasa de raíces:biomasa aérea varía de 0,03 a 0,49; sin embargo, se podrían emplear valores más conservadores (0,10 a 0,15; MacDiken 1997). Otros autores consideran las condiciones climáticas como un factor importante en esta relación; de esta forma, la biomasa de raíces representa el 10% de la biomasa sobre el suelo en áreas húmedas y cerca del 30% en áreas semiáridas (Dixon 1995). Algunos modelos de biomasa podrían ser considerados como referencia (Kurz *et al.* 1996; Cuadro 4).

Cuadro 4 Modelos alométricos para la estimación de biomasa de raíces.

Tipo de especie	Variable	Modelo
De madera suave	Biomasa de raíces	BR = 0,231 (BA)
De madera dura	Biomasa de raíces	BR = e ^{0,359} BA ^{0,639}
Todas	Proporción de raíces finas	Pf = e ^{1,007} BR ^{-0,841}

Fuente: Kurz *et al.* (1996).

BR: biomasa de raíces (t MS ha⁻¹); BA: biomasa aérea (t MS ha⁻¹); Pf: proporción de raíces finas (máximo 0,9).

Hojarasca

La hojarasca comprende todos los residuos orgánicos (hojas, ramas, frutos y semillas) de la superficie del suelo. La cuantificación de este componente es similar a la descrita en el caso del componente herbáceo, la cual es relativamente sencilla y consiste en el pesaje de todo el material vegetal encontrado en marcos (50 x 50 cm), y la toma de una muestra para transformar estos valores a materia seca. En este caso, no es necesario estimar la caída de hojarasca (MacDiken 1997), ya que los inventarios de carbono miden el contenido de carbono en cada componente en un momento dado.

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO EN LA BIOMASA

La estimación del almacenamiento de carbono se realiza a partir de los inventarios de la biomasa del ecosistema, empleando la fracción de carbono, que representa el porcentaje de carbono en la biomasa. Las estimaciones del carbono almacenado en sistemas arbóreos asumen, en su mayoría, un valor de 0,5 (Brown y Lugo 1984, IPCC 1996). La fracción de carbono puede variar típicamente entre 0,42 y 0,47 en el fuste de árboles en sistemas silvopastoriles (Andrade 1999, Ruiz 2002).

Carbono orgánico en suelos

El suelo es un gran sumidero de carbono; sin embargo, los proyectos de carbono no le prestan la atención requerida, ya que las negociaciones de carbono actuales no incluyen este componente, debido a que no es tan visible como la biomasa por encima del suelo. El cambio en el carbono orgánico del suelo debe ser medido a lo largo del sitio del proyecto, a una profundidad de 30 cm, ya que el cambio de uso del suelo ejerce el mayor efecto en las capas superiores (IPCC 1996).

El almacenamiento de carbono orgánico en los suelos depende de dos variables importantes: (1) la concentración de carbono orgánico en suelo y (2) la densidad aparente.

1) Concentración de carbono orgánico en los suelos.

Los suelos agrícolas contienen carbono orgánico, pero no todos los suelos contienen carbono inorgánico (carbonatos). Comúnmente, se emplea el método de Walkley y Black (1938) para determinar el carbono orgánico del suelo. Aunque este método tiene algunas limitaciones, es altamente recomendado cuando no se requiere conocer el contenido total de carbono (MacDiken 1997). Otros métodos estiman la concentración de carbono directamente, tales como los analizadores de C y N.

2) Densidad aparente.

Esta propiedad física de los suelos es el peso por unidad de suelo, y permite conocer el peso de cierto volumen de suelo para hacer las estimaciones del carbono orgánico por unidad de área. La determinación de la densidad aparente es sencilla; entre los métodos más comunes se encuentran el método del cilindro y el del terrón de suelo parafinado. El método del cilindro consiste en introducir un cilindro metálico al suelo, extraer la muestra de volumen conocido y secarla en un horno (a 100 °C, por 72 horas) para determinar su peso. Posteriormente, el peso se divide entre el volumen de suelo (volumen interno del cilindro).

El contenido de carbono orgánico en suelos se calcula con base en las dos variables anteriores y mediante la Ecuación 5.

Ecuación 5. Estimación del contenido de carbono orgánico en suelos.

$$COS = \%CO \times da \times P_s$$

Donde:

COS: carbono orgánico de suelos (t ha⁻¹)

%CO: concentración de carbono orgánico en suelos (%). En caso de tener valores de materia orgánica, $\%CO = 0,58 \times \%MO$, según Walkley y Black (1938)

da: densidad aparente (g cm⁻³)

P_s: profundidad del suelo (cm)

Comprobación en el campo e informe de resultados

Se debe volver a medir entre el 1 y el 5% de todas las PPM dentro de las dos semanas después de la medición inicial (MacDiken 1997). Los reportes del secuestro de carbono deberían ser un tanto conservadores y muy confiables. Por lo general, los resultados se entregan en términos de intervalos de confianza o estimados mínimos confiables, ambos con un nivel de probabilidad de 0,05 (MacDiken 1997).

AGRADECIMIENTOS

A Milena Segura, investigadora del Proyecto Cambio de Usos del Suelo y Flujos de Carbono para América Central, por la revisión y sugerencias para el mejoramiento de este documento.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Albrecht, A; Kandji, ST. 2003. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 99(1-3):15-27.
- Andrade, HJ. 1999. Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 70 p.
- Araújo, TM; Higuchi, N; De Carvalho Jr, JA. 1999. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest site in the state of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management* 117: 43-52.
- Böhm, W. 1979. *Methods of studying root systems*. Berlin, GE, Springer Verlag. 179 p.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. Roma, IT, FAO. 55 p.
- _____; Gillespie, AJR; Lugo, AE. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35: 881-902.
- _____; Lugo, AE. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. *Science* 223: 1290-1293.
- Ciesla, WM. 1996. Cambio Climático, bosques y ordenación forestal. Una visión de conjunto. Roma, IT, FAO. 147 p.
- Dixon, RK. 1995. Agroforestry systems: Sources or sinks of greenhouse gases? *Agroforestry systems* 31: 99-116.
- Gómez-Echeverri, L. (ed.) 2000. Cambio climático y desarrollo. San José, CR, PNUD-Yale School of Forestry and Environmental Studies. 465 p.
- Houghton, RA; Skole, DL; Lefkowitz, DS. 1991. Changes in landscape of Latin America between 1850 and 1985, II: Net release of CO₂ to the atmosphere. *Forest Ecology and Management* 38: 173-199.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1996. Report of the twelfth session of the intergovernmental panel on climate change. Reference manual and workbook of the IPCC 1996 revised guidelines for national greenhouse gas inventories. Ciudad de México, MX.
- _____. 2000. IPCC Special Report: Land use, land use change and forestry. *s.n.t.*
- Kurz, WA; Beukema, SJ; Apps, MJ. 1996. Estimation of root biomass and dynamics for the carbon budget model of the Canadian forest sector. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 1973-1979.
- López, A; Schlönvoigt, A; Ibrahim, M; Kleinn, C; Kanninen, M. 1999. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. *Agroforestería en las Américas* 6(23): 51-53.
- MacDiken, K. 1997. A Guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Arlington, VA, US, Winrock International. 87 p.
- Ortiz, ME. 1993. Técnicas para la estimación del crecimiento y rendimiento de árboles individuales y bosques. Cartago, CR, Instituto Tecnológico de Costa Rica. 71 p. (Serie de Apoyo Académico no. 16).
- Powell, M; Delaney, M. 1998. Carbon sequestration and sustainable coffee in Guatemala. Final Report. Arlington, VA, US, Winrock International. 14 p.
- Ruiz, A. 2002. Fijación y almacenamiento de carbono en sistemas silvopastoriles y competitividad económica en Matiguás, Nicaragua. Turrialba, CR, CATIE. 106 p.
- Segura, M; Kanninen, M. 2002. Inventario para estimar carbono en ecosistemas forestales tropicales. In Orozco, L; Brumer, C. eds. *Inventarios forestales para bosques latifoliados en América Central*. CATIE. p. 202-212. (Serie Técnica, Manual Técnico no. 50).
- Snowdon, P; Raison, J; Keith, H; Montagu, K; Bi, K; Ritson, P; Grier-son, P; Adams, M; Burrows, W; Eamus, D. 2001. Protocol for sampling tree and stand biomass. Australia, Australian Greenhouse Office. 114 p. (National carbon accounting system technical report No. 31). Draft.
- Velasco, A; Ibrahim, M; Kass, D; Jiménez, F; Rivas, G. 1999. Concentraciones de fósforo en suelos bajo sistema silvopastoril de *Acacia mangium* con *Brachiaria humidicola*. *Agroforestería en las Américas* 6(23): 45-47.
- Vine, E; Sathaye, J; Makundi, W. 1999. Guidelines for the monitoring, evaluation, reporting, verification, and certification of forestry projects for climate change mitigation. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. 125 p.
- Walkley, A; Black, CA. 1938. An examination of the Degtjareff's method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.