

## Un Método para la Medición del Carbono Almacenado en la Parte Aérea de Sistemas con Vegetación Natural e Inducida en Terrenos de Ladera en México.

M. Acosta<sup>1</sup>, K. Quednow<sup>2</sup>, J. Etchevers<sup>3</sup> y C. Monreal<sup>4</sup>.

INIFAP

Colegio de Postgraduados, México

e-mail: [acosta@colpos.mx](mailto:acosta@colpos.mx)

### Resumen

A nivel mundial existe la preocupación por el calentamiento de la atmósfera como consecuencia del aumento de la concentración de los gases tipo invernadero de origen antropogénico. El principal de éstos gases, es el CO<sub>2</sub>, el cual se ha incrementado desde 280 ppm que había durante el periodo preindustrial, hasta cerca de 360 ppm que hay en la actualidad. Los bosques, los sistemas agroforestales y la áreas de cultivo en laderas, juegan un papel preponderante en el ciclo global del carbono, porque en ellos intervienen muchos de los procesos biogeoquímicos que regulan el intercambio de carbono que existe entre la atmósfera y la biomasa aérea.

Para determinar la cantidad de carbono proveniente de la biomasa aérea, presente en cada ecosistema, se establecieron cinco parcelas de muestreo de 100 m<sup>2</sup> (4 x 25 m). En estas parcelas se midió la biomasa en los diferentes depósitos: hojarasca o mantillo, hierbas-arbustos (incluyendo árboles < 2.5 cm de diámetro) mediante la ubicación sistemáticamente de dos sitios de submuestreo de 1 m<sup>2</sup> cada uno para las hierbas y arbustos, dentro de ellos, un cuadro de 0.25 m<sup>2</sup> (0.5 x 0.5 m) para medir la hojarasca. La biomasa de los árboles mayores de 2.5 cm de diámetro, se estimó mediante un inventario y el empleo de funciones alométricas especialmente calculadas. El material colectado en los cuadros submuestra (de 1 y 0.25 m<sup>2</sup>) y probetas colectadas de diferentes posiciones de los árboles, fueron analizados en el laboratorio para determinar la biomasa y el contenido de carbono.

Los sistemas vegetales con mayor cantidad de carbono almacenado en la parte aérea fueron el bosque de liquidambar (BL) en la Región Mazateca, el bosque de encino (BE) en la Región Cuicateca y un *acahual* de aproximadamente 10 años (AC10) de la Región Mixe; con 103, 52 y 33 Mg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Los sistemas con menos carbono fueron las praderas (PR) de las regiones Mazateca y Cuicateca y un *acahual* de dos años (AC2) de la Mixe; con 7, 8 y 14 Mg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

El método propuesto y ensayado en el presente estudio, resultó ser práctico para los sistemas forestales de ladera, que se caracterizan por contener una gran cantidad de individuos por unidad de superficie.

---

<sup>1</sup> Investigador Titular del INIFAP. Campo Experimental Valle de México.

<sup>2</sup> Estudiante de la BTU Alemania.

<sup>3</sup> Profesor Investigador del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

<sup>4</sup> Special Advisor – Environment/Energy Agriculture and Agri-Food Canada.

## **A Method for Measuring Stored Carbon in the Aerial Part of Systems with Natural and Induced Vegetation on Hillsides in Mexico**

### **Abstract**

There is worldwide concern about global warming of the atmosphere as a consequence of the increase in the concentration of greenhouse-type gases that have resulted from human activity. The most important of these gases is CO<sub>2</sub>, which has increased from 280 ppm during the pre-industrial period, to nearly 360 ppm today. The forests, agroforestry systems and cropping areas on hillsides play a predominant role in the global cycle of carbon. In these systems many of the biogeochemical processes that regulate carbon exchange between the atmosphere and aerial biomass take place.

To determine the quantity of carbon from the aerial biomass that is present in each ecosystem, five sampling plots 100 m<sup>2</sup> (4 x 25 m) were established. In these plots biomass was measured in different deposits: litter, herbaceous plants and bushes (including trees < 2.5 cm in diameter) by means of systematic location of two sub-sampling sites 1 m<sup>2</sup> each for herbaceous plants and bushes and, within these, a square 0.25 m<sup>2</sup> (0.5 x 0.5 m) to measure litter. The biomass of trees larger than 2.5 cm in diameter was estimated using an inventory and allometric functions that were specially calculated. The material collected in the sub-sampling squares (1 and 0.25 m<sup>2</sup>) and samples of wood collected at different points of the trees were analyzed in a laboratory to determine biomass and carbon content.

The plant systems with the largest quantity of carbon stored in the aerial part were a sweetgum in the Mazateca region, an oak forest in the Cuicateca region, and an acahual approximately 10 years old in the Mixe region, with 103, 52, and 33 Mg·ha<sup>-1</sup>, respectively. The systems with the least carbon were the pasturelands in the Mazateca and Cuicateca regions and a two-year-old acahual in the Mixe region, with 7, 8, and 14 Mg·ha<sup>-1</sup>, respectively.

The method proposed and tested in this study is practical for hillside forest systems, which are characterized by a composition of a large number of individuals per unit of area.

---

### **Introducción**

Estudios recientes de la manera como procede el calentamiento global, dados a conocer en la reunión de enero 2001 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2001) en Shangai, señalan un panorama bastante más preocupante para los próximos 100 años que las proyecciones previas. Las temperaturas medias del globo pudiesen alcanzar incrementos de entre 1.4 y 5.6°C en este siglo, superiores a las previsiones de 1 a 3.5°C hechas con anterioridad.

Se sabe que entre los responsables del aumento de la temperatura global está el CO<sub>2</sub> atmosférico, cuya concentración ha aumentado considerablemente a partir de la era industrial debido al frecuente uso y combustión de los combustibles fósiles. Sin embargo, el cambio de uso del suelo por la tala de terrenos forestales para convertirlos a terrenos de cultivo, ha contribuido también, con el incremento de este gas hacia la atmósfera; de los 136 Gt C que se estiman fueron emitidas a la atmósfera durante el período 1850-1998, el 87 % correspondieron a las áreas forestales y el 13 % de cultivo de pastizales (Houghton, 1999; Houghton *et al.*, 1999).

Los bosques, los sistemas agroforestales y la áreas de cultivo en laderas, juegan un papel preponderante en los procesos biogeoquímicos y por lo tanto en el ciclo global del carbono. Desafortunadamente, a nivel mundial muchos de los ecosistemas de este tipo han sido alterados o destruidos a través del tiempo, por ejemplo, la deforestación reportada en México para mediados de la década de los años ochenta fue de 670 mil ha/año, de las cuales 170 mil correspondieron a bosque templado y 500 mil a bosques tropicales o semitropicales (Maser *et al.*, 1997).

Tal situación se puede revertir y convertir a las áreas forestales en sumideros de carbono para reducir la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la atmósfera, el potencial que tiene México para secuestrar carbono es de 33 a 113 x 10<sup>6</sup> Mg C para áreas forestales, de 30 a 85 x 10<sup>6</sup> Mg C mediante plantaciones forestales y de 1 a 3 x 10<sup>6</sup> Mg C debido a la regeneración natural con especies forestales (Trexler y Haugen, 1995). Sin embargo para determinar la cantidad de carbono que pueden aportar diferentes

**Cuadro 1.** Relación de los sistemas con vegetación natural e inducida evaluados en las tres regiones de Oaxaca, México.

| Mazateca                              | Cuicateca             | Mixe                           |
|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Bosque Aile 10 años (40) <sup>1</sup> | Bosque de Encino (25) | <i>Acahual</i> de 2 años (50)  |
| Bosque de Aile (35)                   | Pradera (10)          | <i>Acahual</i> de 7 años (25)  |
| B. de Liquidambar (20)                |                       | <i>Acahual</i> de 15 años (35) |
| Pradera (30)                          |                       |                                |

<sup>1</sup>Los valores entre paréntesis significan la pendiente en porcentaje

ecosistemas, es necesario recurrir a técnicas de muestreo eficientes las cuales estiman la cantidad de carbono presente en determinado compartimiento; por ejemplo, para estimar la cantidad de carbono presente en el estrato arbóreo es necesario recurrir al uso de ecuaciones alométricas que estiman la cantidad de biomasa y carbono de acuerdo al tamaño de los árboles, sobre este aspecto, varios trabajos han reportado el uso de relaciones alométricas para determinar la cantidad de carbono presente en determinado tipo de bosque o vegetación (Brown, *et al.* 1989; Deans, *et al.* 1996 y De Jong, *et al.* 1995)

Con el fin de entender mejor la participación de la vegetación en los procesos biogeoquímicos del ciclo global del carbono, el objetivo del presente estudio fue determinar la cantidad de carbono que se encuentra almacenado en la parte aérea de los ecosistemas con vegetación forestal y vegetación de pastizal en terrenos de ladera, que se localizan en tres regiones de la Sierra Norte del Estado de Oaxaca.

## Metodología

El trabajo se realizó en tres regiones de Oaxaca, México, caracterizada por diferentes ecosistemas de vegetación forestal que difieren entre sí por la edad, por la mezcla de especies, por el tipo de suelo y por la densidad. Tales áreas han estado sujetos a una combinación de uso agrícola y forestal de manera cíclica. La práctica común que se practica en el método de roza-tumba-quema (RTQ) consiste en intercalar periodos de descanso con periodos de cultivos anuales, durante el uso del suelo con cultivos anuales se siembra generalmente maíz (*Zea mays*) y frijol (*Phaseolus vulgaris*). Durante los periodos de descanso (que varía entre 3-15 años), se reestablece la vegetación original con las especies herbáceas, arbustivas y arbóreas, típicas de

cada región, este tipo de vegetación adquiere el nombre genérico local de *acahual*.

Las tres regiones estudiadas fueron: la Mazateca, Cuicateca y Mixe, éstas se localizan en la cuenca hidrológica del río Papaloapan en la zona natural denominada “La Cañada”, en la Sierra Norte de ese Estado, México. Las tres regiones cubren una superficie de alrededor de un millón hectáreas que incluye 62 municipios y 716 comunidades rurales. La población de las tres regiones la integran aproximadamente 325 mil habitantes; de los cuales el 53% se concentra en la región Mazateca (Colegio de Postgraduados, 2001). Más detalles de las regiones estudiadas se hacen referencia en Etchevers *et al.* (2001).

Los sistemas con vegetación natural y vegetación inducida que se evaluaron, se muestran en el Cuadro 1, los sistemas que carecen de estrato arbóreo fueron las praderas en las regiones Mazateca y Cuicateca y el *acahual* de dos años en la región Mixe, los demás sistemas contienen arbolado adulto o mayor de 5 cm de diámetro normal (DN) y éste fue considerado como estrato arbóreo.

En cada uno de los sistemas estudiados, se seleccionaron cinco parcelas de muestreo de 100 m<sup>2</sup> (4 x 25 m) después de haber sido georeferenciadas, en cada se midió la biomasa aérea en tres estratos: hojarasca o mantillo, hierbas-arbustos (incluidos los árboles < 2.5 cm de DN) y los árboles de más de 2.5 cm de DN. La metodología empleada en este caso es una variación de la propuesta de Woomer y Palm (1999) y Kotto-Same *et al.*, (1997). Mediante la ubicación sistemática de dos sitios de submuestreo por parcela, se ubicaron dos cuadros de 1 m<sup>2</sup> para medir la cantidad de biomasa en hierbas-arbustos; dentro de ellos, en un cuadro de 0.25 m<sup>2</sup> (0.5 x 0.5 m) se midió la biomasa de la hojarasca o mantillo. La biomasa de los árboles mayores de 2.5 cm de diámetro,

se estimó mediante un inventario total de árboles y el empleo de funciones alométricas especialmente calculadas que se especifican más adelante. El 100 % del material colectado en los cuadros submuestra (de 1 y 0.25 m<sup>2</sup>) de hojarasca o mantillo y de hierbas-arbustos, fue trasladado al laboratorio, ahí se secó a una temperatura de 75 °C. Con la información colectada en campo de las variables dasométricas de DN y Altura, junto con la información de peso seco por cada individuo, se realizó el ajuste de las ecuaciones alométricas por cada especie. La selección de especies para generar las ecuaciones alométricas, correspondió a la abundancia de ellas en las regiones estudiadas y fueron las siguientes: *Clethra hartwegii*, *Rapanea myricoides*, *Alnus* spp, *Liquidambar macrophylla*, *Inga* spp.y *Quercus* spp.; las primeras cinco, son típicas del bosque mesófilo de montaña y son las que se encontraron con mayor frecuencia en las regiones Mazateca y Mixe. El *Quercus* spp. se localizó con mayor frecuencia en la región Cuicateca, aunque también se presentó en las demás regiones.

El modelo utilizado para generar las ecuaciones alométricas, es el que proviene de la función de crecimiento alométrica y que expresado en su forma exponencial es:

$$Y=aX^b,$$

en donde Y es la biomasa en kilos, X es el DN en centímetros, a y b son los parámetros a estimar. En su forma lineal la función se expresa de la siguiente manera:

$$\ln(Y)=\ln(a)+b \ln(X).$$

Para determinar la proporción de carbono por especie, se utilizaron las mismas muestras de los árboles que se

trasladaron al laboratorio: rodajas a lo largo del fuste y cuatro ramas de cada individuo. Ese material después de que se secó y pesó, se obtuvo una muestra representativa, por ejemplo para las rodajas se utilizó una fracción de ésta similar a una rebanada de pastel con el objetivo de que la muestra contuviera proporcionalmente material de la periferia y de la parte central de cada rodaja. De las ramas, se obtuvo la muestra de manera proporcional del material leñoso y del follaje. Una vez que se obtuvieron tales muestras, se procedió a molerlas y se hizo pasar por una malla 30 para analizarla y obtener la proporción de carbono. Para calcular el porcentaje carbono por especie, se ponderó de acuerdo a la biomasa que representó el material colectado en campo.

Una vez que se calculó la biomasa por cada especie, mediante el inventario del estrato arbóreo en cada parcela y la proporción de carbono por especie, se calculó la cantidad de carbono en Mg.ha<sup>-1</sup> para este estrato.

## Resultados y discusión

### Ecuaciones alométricas.

La ecuación que se ajustó fue en la expresión lineal, de tal forma que fue necesario obtener el logaritmo tanto de la variable dependiente (biomasa) como de la variable independiente (DN), por ejemplo, para este caso se usó la transformación Ln (.), que significa el logaritmo natural, de esta forma al hacer el ajuste de este modelo el cual expresado queda como:  $\ln(\text{Bio})=\ln(a)+b \ln(\text{DN})$ , en donde **a** y **b** son los parámetros del modelo a ajustar, nótese que el modelo es lineal porque expresa la forma típica de un modelo lineal  $Y= \beta_0 + \beta_1 X$ , con  $Y=\ln(\text{Bio})$ ,  $\beta_0=\ln(a)$ ,  $\beta_1=b$  y  $X=\ln(\text{DN})$ . Los resultados para el ajuste del modelo lineal para cada especie se presentan en el Cuadro 2.

**Cuadro 2.** Valor de parámetros, límites de confianza con un 95% y coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), ajustados de acuerdo al modelo lineal, para cada especie.

| Especie            | Valor   | $\beta_0$ |         | Valor  | $\beta_1$ |         | Valor de R <sup>2</sup> |
|--------------------|---------|-----------|---------|--------|-----------|---------|-------------------------|
|                    |         | L. Inf.   | L. sup. |        | L. inf.   | L. sup0 |                         |
| <i>Alnus</i>       | -2.4134 | -3.5434   | -1.2831 | 2.3290 | 1.8900    | 2.7680  | 0.957                   |
| <i>Quercus</i>     | -2.2693 | -2.9328   | -1.6057 | 2.3897 | 2.1169    | 2.6624  | 0.987                   |
| <i>Rapanea</i>     | -1.9874 | -2.7608   | -1.2140 | 2.2599 | 1.9111    | 2.6087  | 0.987                   |
| <i>Clethra</i>     | -1.9008 | -2.5569   | -1.2448 | 2.1497 | 1.8113    | 2.4881  | 0.897                   |
| <i>Liquidambar</i> | -2.2240 | -2.6075   | -1.8404 | 2.4510 | 2.2870    | 2.6149  | 0.993                   |
| <i>Inga</i>        | -1.7583 | -2.4641   | -1.0525 | 2.2637 | 2.0000    | 2.5273  | 0.973                   |
| Todas              | -2.1942 | -2.4754   | -1.9130 | 2.3644 | 2.2484    | 2.4804  | 0.971                   |

L. inf. =Límite inferior; L. sup. = límite superior;

**Cuadro 3.** Cantidad de carbono por sistemas vegetal y por componente estrato, para las tres regiones estudiadas.

| Componente                    | R. Mazateca  |              |              |                     | R. Cuicateca |             | R. Mixe      |              |             |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
|                               | BL           | BA           | BA10         | PR                  | BE           | PR          | AC10         | AC7          | AC2         |
|                               |              |              |              | Mg.ha <sup>-1</sup> |              |             |              |              |             |
| Mantillo                      | 5.87         | 8.42         | 12.56        | 0                   | 7.62         | 0           | 7.32         | 6.72         | 3.29        |
| Hierbas-arbustos <sup>1</sup> | 0.48         | 0.98         | 3.03         | 5.36                | 0            | 2.18        | 4.28         | 1.91         | 6.57        |
| Árboles                       | 93.15        | 36.90        | 15.42        | 0                   | 29.98        | 0           | 13.44        | 15.48        | 0           |
| <b>Carbono Total</b>          | <b>99.50</b> | <b>46.31</b> | <b>31.02</b> | <b>5.36</b>         | <b>37.60</b> | <b>2.18</b> | <b>25.04</b> | <b>24.12</b> | <b>9.86</b> |

BL= Bosque de liquidambar; BA = B. de aile; BA10 = B. de aile de 10 años; PR = Pradera;  
AC2, AC7; AC10 = *Acahual*es de 2, 7 y 10 años.

El ajuste para cada especie fue aceptable ya que el valor de R<sup>2</sup> fue superior a 0.95, se puede apreciar además, que los valores de los parámetros relacionadas con la pendiente del modelo lineal para cada especie, son similares, lo que hace suponer que es posible utilizar un modelo general único para las especies estudiadas y expresar la relación de la biomasa con el DN, por eso se incluyó en la última hilera del Cuadro 2, los resultados estadísticos de los parámetros con el coeficiente de determinación cuando se ajustaron los datos de todas las especies al mismo modelo lineal.

Aunque desde el punto de vista estadístico, en apariencia el modelo ajustado donde se incluyen a todas las especies, es el mismo que el de las especies individuales, al hacer el cálculo de la biomasa para el estrato arbóreo, se utilizó el modelo individual.

### Carbono aéreo total.

En el Cuadro 3, se presentan los resultados de la cantidad de carbono aéreo por estrato para las tres regiones estudiadas y por cada sistemas de manejo.

En el bosque de aile de 10 años de la región Mazateca, la cantidad de carbono del mantillo y de los árboles fue muy similar, en sí la cantidad de carbono provenientes del mantillo fue superior a todos los sistemas evaluados en las tres regiones. Los sistemas que obtuvieron cantidades de carbono similares en el mantillo fueron: el bosque de aile de la región Mazateca, el bosque de encino de la región Cuicateca, y los *acahuales* de 7 y 10 años de la región Mixe, con aproximadamente entre 7 y 8 Mg ha<sup>-1</sup>.

La mayor cantidad de carbono para el estrato de hierbas-arbustos se obtuvo en el *acahual* de 2 años de la región Mixe, este resultado se puede atribuir a que la mayor cantidad de la vegetación en este sistema, pertenece a esa categoría, porque no hay arbolado y de mantillo sólo se obtuvieron poco más de 3 Mg ha<sup>-1</sup>.

Al analizar los sistemas con arbolado de la región Mazateca, se puede deducir que a mayor cantidad de carbono en el estrato arbóreo, menor cantidad en el estrato de hierbas-arbustos, incluso esta misma observación se cumple en los sistemas de la región Mixe, ya que el *acahual* de 7 años obtuvo mayor cantidad de carbono en el estrato arbóreo y menor cantidad en el mantillo, comparado con el sistema *acahual* de 10 años de la misma región (Cuadro 3). Este resultado quizá se deba a la cantidad de luz que el estrato arbóreo deja pasar hasta el suelo, al haber mayor densidad de arbolado, la cantidad de luz que pasa hasta el piso forestal, es menor, y por lo tanto el estrato de hierbas-arbustos se reduce, ya que sólo prosperan aquellas especies que son tolerantes a la sombra.

En la Figura 1 se muestran los resultados de la cantidad de carbono por componente para los sistemas de vegetación forestal en las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe, se puede observar que la mayor cantidad de carbono se encuentra en el bosque de Liquidambar de la región Mazateca con casi 100 Mg·ha<sup>-1</sup>, debido a que es un bosque de aproximadamente 40 años y por lo tanto cuenta con árboles de gran tamaño, la mayoría de los cuales tienen más de 20 cm de DN por lo tanto, poco más del 90% del carbono aéreo proviene de este estrato para este sistema de vegetación natural.

En los sistemas de vegetación con estrato arbóreo, los factores que están influyendo en la cantidad de carbono de la parte aérea son: la edad, la densidad y la mezcla de especies ya sea a nivel herbáceo, arbustivo o arbóreo. Una vez que la vegetación natural se establece, el incremento de la biomasa dependerá principalmente de las condiciones edafológicas y climáticas que influirán en la tasa de rendimiento y dependiendo de la capacidad de respuesta que presenten las especies, será la capacidad de crecimiento y por lo tanto de captura de

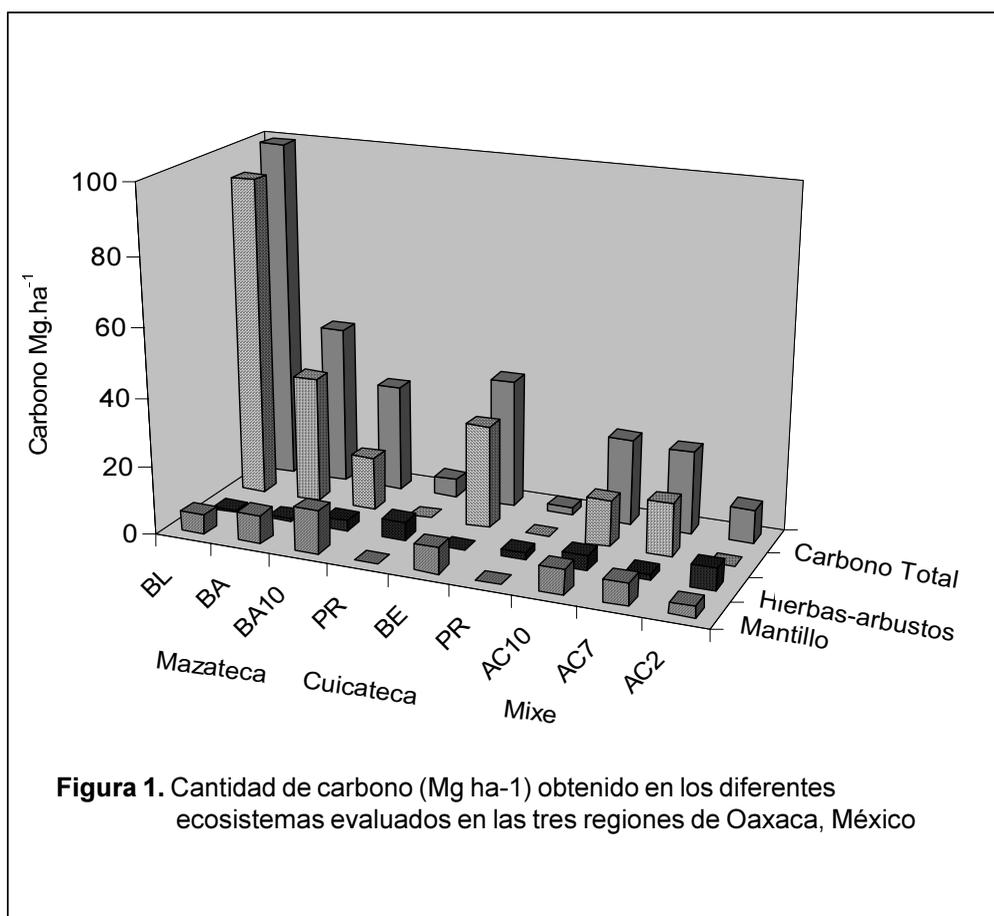
carbono. Por ejemplo, durante el desarrollo de los *acahuales* la cantidad de especies y la frecuencia de éstas va cambiando conforme se desarrolla este tipo de vegetación, así los *acahuales* de 2 años contienen una mayor diversidad de especies que los de 7 o 10 años, ya que debido a la competencia y a la dinámica sucesional que ocurre en este tipo de ecosistemas, los *acahuales* con mayor edad finalmente tienden a convertirse en bosques de una determinada especie, la cual, finalmente domina sobre las demás.

Es importante resaltar la cantidad de carbono que se obtiene de la hojarasca o mantillo, comparada con la cantidad de carbono de las hierbas-arbustos; sólo en las praderas y en el *acahual* de 2 años de la región Mixe, el carbono del mantillo es menor (Figura 1) por lo tanto este estrato es de gran importancia en la dinámica de los ecosistemas; sin embargo, al mismo tiempo, es el más vulnerables a los cambios o factores externos que afectan a estos sistemas de vegetación, ya que si ocurre un incendio; la hojarasca o mantillo es el más afectado y se

reduce. Por otra parte, si ocurre un viento fuerte que llegue a derribar ramas de los árboles, este estrato sería el que aumentaría considerablemente.

Tanto las praderas (PR) de las regiones Mazateca y Cuicateca como el *acahual* de 2 años de la región Mixe, fueron los sistemas que menor cantidad de carbono registraron con menos de 10 Mg·ha<sup>-1</sup> para el AC2 de la Mixe, poco más de 5 Mg·ha<sup>-1</sup> para la PR de la región Mazateca y sólo 2 Mg·ha<sup>-1</sup> para la pradera de la Cuicateca, es claro que para estos dos sistemas vegetales, la única biomasa aérea es el pasto, porque se supone que es el principal tipo de vegetación en este sistema. Por otra parte se debe considerar que ambas praderas están bajo manejo por lo que existe la presencia del ganado constantemente.

Un resultado que sorprende es la cantidad de carbono del estrato arbóreo del *acahual* de 7 años comparado con el de 10, porque es mayor, cuando se supone que debería ser lo contrario. Sin embargo a pesar de tener más edad el de 10 años se ubica en una área con mayor



**Figura 1.** Cantidad de carbono (Mg ha<sup>-1</sup>) obtenido en los diferentes ecosistemas evaluados en las tres regiones de Oaxaca, México

pendiente que el AC7 (Cuadro 1) y eso probablemente esté influenciando la cantidad de individuos por unidad de superficie, o sea que la densidad, aunque el tamaño de los individuos para el *acahual* de 10 años pudieran ser mayores.

Al comparar los resultados de las praderas, resalta la cantidad de carbono que se encontró en la pradera de la región Mazateca que superó con más del doble a la pradera de la región Cuicateca, esto se debe principalmente a las condiciones pluviométricas presentes en cada región, la precipitación que ocurre en la región Mazateca, aunque no se ha determinado con precisión, supera con mucho a la de la región Cuicateca.

## Conclusiones

El uso de relaciones alométricas para estimar la cantidad de biomasa y por lo tanto de carbono para el estrato arbóreo, resultó ser práctico y confiable.

La cantidad de carbono por la biomasa aérea presente en cada sistema de vegetación varió considerablemente, incluso dentro de una misma región.

El bosque de liquidambar de la región Mazateca, fue el que obtuvo la mayor cantidad de carbono de la parte aérea con casi 100 Mg ha<sup>-1</sup>, con casi el 90 % del estrato arbóreo.

Los sistemas con menor cantidad de carbono en la parte aérea fueron las paraderas, con poco más de 5 Mg ha<sup>-1</sup> en la región Mazateca y poco más de 2 Mg ha<sup>-1</sup> en la región Cuicateca.

Uno de los factores que influyó considerablemente en la cantidad de C en la parte aérea de los sistemas vegetales estudiados fue la edad.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Global Environment Facility (GEF), al Banco Mundial (BM), a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA) al Gobierno del Estado de Oaxaca y a todas las personas que a través de sus esfuerzos de coordinación y trabajo colaboraron a la realización de esta investigación.

## Literatura citada

- Brown, S., Gillespe, A. J. R., and Lugo, A. E. 1989. Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35(4):881-902.
- Colegio de Postgraduados. 2001. Documento de la Tercera Reunión del Comité Técnico de Coordinación y Seguimiento del Proyecto Manejo Sustentable de Laderas. Oaxaca, México 30 de Marzo de 2001. 84 p.
- Deans, J. D., J. Mora., and J. Grace. 1996. Biomass relationships for tree species in regenerating semi-deciduous tropical moist forest in Cameroon. *Forest Ecology and Management* 88:215-225.
- De Jong, B. H. J., Montoya-Gómez, G., Nelson, K., Soto-Pinto, L., and Tipper, R. 1995. Community forest management and carbon sequestration: A feasibility study from Chiapas, México. *Interciencia* 20(6):409-416.
- Etchevers, J. D., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los *stocks* de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. En este volumen.
- Houghton, R. A. 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from change in land use 1850-1990. *Tellus*, 50B, 298-313.
- Houghton, R. A., J. L. Hackles, and K. T. Lawrence. 1999. The U. S. carbon budget: contribution from land use change. *Science*, 285, 574-578.
- IPCC, 2001. Summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>. Julio 31.2001)
- Kotto-Same, J., P. L. Woomeer, A. Maukam, and L. Zapfpack. 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of humid forest zone in Cameroon. *Agriculture Ecosystem and Environments* 65: 245-256.
- Masera, R. O.; M. J. Ordóñez and R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35:265-295.
- Trexler, M. C. y C. Haugen. 1995. Keeping it green: tropical forestry opportunities for mitigating climate change. WRI, EPA.
- Woomeer, P. L. and C. A Palm. 1998. An approach for estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. No publicado.



## Un Método para la Medición del Carbono en los Compartimientos Subterráneos (Raíces y Suelo) de Sistemas Forestales y Agrícolas en Terrenos de Ladera en México.

M. Acosta<sup>1</sup>, J. D. Etchevers<sup>2</sup>, C. Monreal<sup>3</sup>, K. Quednow<sup>4</sup> y C. Hidalgo<sup>2</sup>.

*Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México  
e-mail acostam@colpos.mx*

### Resumen

El secuestro del C es una posibilidad de ingresos adicionales para productores rurales, aun cuando mercados y mecanismos que operarán son todavía emergentes. Los sistemas de vegetación (naturales, forestales inducidos y agrícolas) tienen capacidad de capturar y secuestrar carbono. Sin embargo, el C que se captura y almacena en la parte subterránea de los ecosistemas terrestres no ha sido considerado como un mecanismo de secuestro por los diseñadores de las políticas sobre cambio climático, a diferencia de la parte aérea. Sin embargo, casi 75 % del C de los ecosistemas se encuentra en el suelo, como biomasa de raíces o en formas estables, como compuestos geoquímicos.

Aunque la estimación del carbono almacenado en el suelo no es fácil de cuantificar ésta es necesaria para entender mejor la distribución y la importancia relativa de los almacenes aéreos y subterráneos de C en los ecosistemas terrestres. El objetivo del presente trabajo fue someter a prueba rutinas confiables de campo y laboratorio diseñadas *ex profeso*, para medir C en la parte subterránea de los eco- y agroecosistemas de laderas pronunciada (25 a 60 % de pendiente).

Se seleccionaron 26 sistemas de vegetación natural y agrícola, en las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe del estado de Oaxaca, México, que representan a aproximadamente  $1 \times 10^6$  ha. En ellos se midió el C acumulado en la parte aérea y subterránea. Aquí se reportan aspectos metodológicos y algunos resultados del C en el componente subterráneo. Los sistemas seleccionados tenían especies de ciclo anual, mixtos (frutales+anuales), agrícolas en descanso o *acahuales* y cultivos permanentes como praderas, café y árboles.

La biomasa de raíces y C del suelo se determinó en muestras colectadas en “relojes” de 1 m de diámetro (12 horas; 12 norte magnético) en suficientes sitios por parcela, para estimar la variabilidad espacial del C acumulado. El muestreo de la parte subterránea (0 a 105 cm; incrementos de 15 cm), en dos puntos de cada reloj (12 y 6 horas) se hizo con barrena (4.77 cm de diámetro 19 cm de largo), para estimar simultáneamente la densidad aparente del suelo. Los puntos se marcaron magnéticamente y georeferenciaron. Las raíces, piedras y fragmentos vegetales visibles de las muestras fueron separados y pesados, después de haberlas secado al aire, para estimar la masa, el volumen y la densidad aparente del suelo. Una submuestra éste (*ca.* 5 g) se secó a 105 °C para determinar el contenido de humedad residual, se pulverizó en molino de ágata y se analizó para C orgánico en un aparato automatizado, de acuerdo a protocolos estandarizados.

---

1 Investigador Titular del INIFAP. Campo Experimental Valle de México.

2 Profesor Investigador del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

3 Special Advisor – Environment/Energy Agriculture and Agri-Food Canada.

4 Estudiante de la BTU Alemania.

## **A method for measuring carbon in the underground (roots and soil) compartments of forest and agricultural systems on hillsides in Mexico**

### **Abstract**

*The capture of C represents a possibility of earning additional incomes for rural producers, even though markets and mechanisms of operation are still incipient. Systems of vegetation (natural and induced forests and agricultural land) are capable of capturing and sequestration of C. In contrast with the aerial part, the underground part of land ecosystems has not been considered as a mechanism of capturing and storing C by designers of policies related to climatic change. However, almost 75% of the C in ecosystems is found in the soil as root biomass or in stable forms such as geochemical compounds.*

*Although the estimation of carbon stored in the soil is not easy to quantify, it is necessary to better understand the distribution and relative importance of the aerial and underground stores of C in land ecosystems. The objective of this study was to test reliable field and laboratory routines designed ex profeso to measure underground C of the ecosystems and agricultural ecosystems on pronounced slopes (25 to 60%).*

*Twenty-six systems of natural and agricultural vegetation were selected in the Mazateca, Cuicateca, and Mixe regions of the state of Oaxaca, Mexico, which cover approximately  $1 \times 10^6$  ha. In these regions accumulated C was measured in the aerial and underground parts. Here, methodological aspects and some results of C measurements in the underground part are reported. The selected systems had annual species, mixed species (fruit trees + annuals), agricultural fallow or acahual, and permanent crops such as grass, coffee and trees.*

*The root biomass and soil C were determined in samples collected in 1 m diameter "clocks" (12 hours; 12 magnetic north) in sufficient plot sites to estimate the spatial variability of accumulated C. Sampling of the underground part (0 to 105 cm with 15 cm increments) in two points of the clock (12 and 6 hours) was carried out with a drill (4.77 cm in diameter and 19 cm long) to estimate the bulk density of the soil simultaneously. The points were marked magnetically and were located with geographic co-ordinates. The roots, pebbles, and visible plant fragments of the samples were separated and weighed, after air-drying, to estimate soil mass, volume and bulk density. A sub-sample of this (ca. 5g) was dried at 105 °C to determine residual moisture content. The sub-sample was pulverized in an agate mill and analyzed for organic C in an automatic device, following standardized protocols.*

---

### **Introducción**

El fenómeno del calentamiento global ha sido reconocido como una amenaza mayor para la humanidad por prácticamente todos los estados del mundo y por los organismos multilaterales (Andrasko, 1990; Bouwman and Leemans, 1995; Couzin, 1999; Fosberg, *et al.* 1992; IPCC, 1997; IPCC, 2001; Soroos, 1998; Thomas, *et al.* 1997 y Waring, *et al.* 1986). Como una manera de tratar el problema a nivel global, se instituyó, después de la histórica reunión de Río de Janeiro en 1991, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Este panel ha hecho una serie de propuestas a los estados relativas a la problemática destinadas a paliar las causas del mencionado cambio. Una de ellas se refiere a la reducción de las emisiones de los llamados gases invernaderos (GI). Los GI atrapan las emisiones de radiación infrarroja en la atmósfera produciendo un aumento de la temperatura de ésta. De no existir esos

gases la mayoría de la radiación infrarroja (producto del cambio de la longitud de onda de las radiaciones solares de alta energía al chocar con la tierra), cerca de un 30 %, abandonaría la atmósfera sin causar calentamiento, pero las moléculas de esos gases las retienen y producen lo que se conoce como efecto invernadero.

Como consecuencia del mencionado calentamiento global, el ciclo hidrológico se está modificando. Habrá mayor humedad ambiental y lluvias. Se estima que en el hemisferio norte se incrementarán las precipitaciones en las latitudes medias y altas, y continuará el proceso de adelgazamiento de las capas de hielos. Globalmente se espera un aumento del nivel de los mares de 88 cm (IPCC, 2001), lo cual provocará efectos catastróficos en los litorales y territorios insulares, afectando de paso tierras de cultivo en diferentes países.

Los GI que realmente preocupan son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los fluoroclorocarbono (FCC). El primero de ellos es el más abundante de los gases producidos por la actividad económica del hombre (agricultura, cambio de uso del suelo, industria, transporte, producción de energía, origen domésticos, incendios forestales, etc). Casi un tercio de la emisiones de este GI, en el caso de México, están ligadas a la actividad rural (Maser, 1985, De Jong, 1997). El CH<sub>4</sub> y los NO<sub>x</sub> también están relacionados, en proporción importante, a la agricultura (ganado rumiante y uso de fertilizantes nitrogenados, respectivamente). Los FCC son de origen doméstico e industrial principalmente (refrigeración, transformadores).

El CO<sub>2</sub> atmosférico, que es uno de los gases de mayor importancia por su concentración en la atmósfera y por su relación directa con las actividades antropogénicas, ha aumentado su concentración 31 % entre 1750 y el presente, al pasar de 280 a 367 ppm de CO<sub>2</sub>. Dicha concentración es la mayor de los últimos 420 mil años y probablemente la mayor de los últimos 20 millones de años de la historia de la tierra.

En México, el Instituto Nacional de Ecología ha señalado que la contribución de este sector rural a la emisión de CO<sub>2</sub> corresponde a 30.6 % del total de las emisiones. Estas emisiones se atribuyen principalmente al cambio de uso del suelo y a la deforestación. El CO<sub>2</sub> que proviene de este último sector es mayormente producto de la oxidación de los residuos orgánicos acumulados en suelo y en la superficie de la tierra, que al desaparecer el bosque quedan desprotegidos y expuesto a la mencionada transformación química. Por lo que el suelo, además de ser una almacén potencial de C, es una fuente potencial de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera

De acuerdo a una reciente publicación (Schulze *et al.*, 2000), la contribución de CO<sub>2</sub> al ambiente atribuible a esta vía, sería mayor que la captura que pueda realizar una plantación forestal nueva, generándose un flujo neto de este gas hacia la atmósfera. Esta posición es contraria a lo que comúnmente se indica en la literatura a este respecto, que propone la sustitución de masas boscosas viejas por nuevas plantaciones. Esto quiere decir, que el CO<sub>2</sub> que los árboles jóvenes absorben mediante el proceso de fotosíntesis (captura de carbono) en una cierta superficie, es menor que la emisión de este gas desde esa misma superficie generándose un balance negativo. Esta situación se suma al balance general negativo que existe entre la emisión de CO<sub>2</sub> desde distintas fuentes (agricultura, generación de energía, industria, transporte, usos domésticos, etc.) y la captura de carbono por el bioma, lo cual permite que haya una acumulación neta

de este gas en la atmósfera, con las posibles consecuencias arriba descritas.

A pesar de estas críticas se piensa (Watson, 2001) que las actividades relacionadas con el uso de la tierra, el cambio de uso de la misma y la forestería (LULUCF, por sus siglas en inglés) pueden jugar un papel importante en reducir la acumulación de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, particularmente en el corto plazo.

Las metodologías para estudiar los almacenes de C en el suelo y, en particular, en condiciones de agricultura y forestería de laderas, son escasas. Además, un problema que cada vez es más aparente en el ámbito científico son las dificultades que se tienen para comparar resultados de captura de C en el suelo e integrar bases de datos confiables, debido a las diferencias en la forma en como se hacen las mediciones.

El objetivo del presente trabajo fue establecer una metodología estandarizada para medir los componentes subterráneos de C orgánico del suelo y las raíces, que pudiera aplicarse en el estudio de la capacidad de captura de C de sistemas de vegetación contrastantes existentes en tres regiones diferentes de la Sierra Norte del estado de Oaxaca, México, así como proveer de una metodología que pudiese usarse en estudios de captura de C de largo plazo.

## Materiales y Métodos

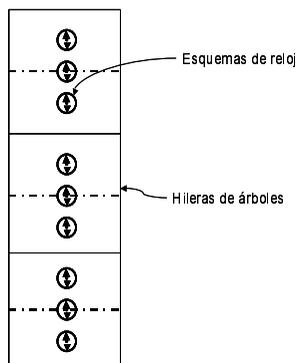
El trabajo se realizó en tres regiones (Mazateca, Cuicateca, Mixe) de la Sierra norte del estado de Oaxaca, México, que abarcan aproximadamente 1 x 10<sup>6</sup> ha. En cada región se seleccionó una microcuenca representativa del paisaje. En Etchevers *et al.* (2001) se describen las características de cada las microcuencas y los sistemas de vegetación seleccionados.

### *Muestreo de suelo y raíces en las parcelas de experimentación*

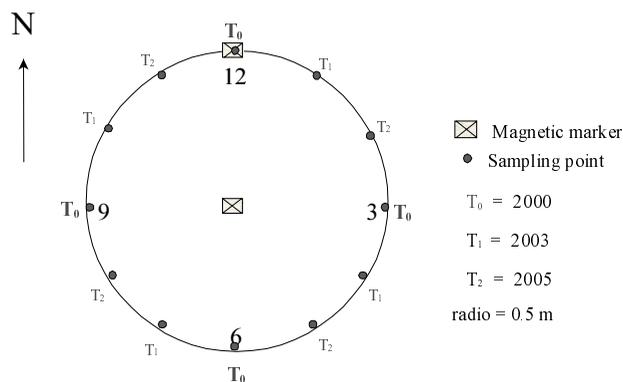
En los sistemas agrícolas anuales (tradicionales o *milpa*) y mixtos (frutales en hileras y cultivos agrícolas anuales intercalados) se muestreó en nueve posiciones, tres por repetición (Figura 1). En cada posición se estableció un "reloj", que permitirá volver a coleccionar suelo y raíces en el mismo sitio en futuras mediciones. Este reloj fue marcado magnéticamente con una barra de hierro de 40 cm enterrada en el centro del círculo, y que se puede detectar con un detector de metales, además fue georeferenciado.

El esquema utilizado permite, además, estimar el movimiento de suelo por erosión entre la posición alta del círculo en la pendiente y la posición baja, medir la

deposición y determinar la captura de carbono asociado con el efecto de tratamiento agronómico a lo largo de la pendiente. En cada “reloj” se muestrearon dos puntos tal como se muestra en la Figura 2.



**Figura 1.** Diseño de muestreo de suelo y distribución de los esquemas de reloj en las parcelas de los sistemas agrícolas y mixtos.

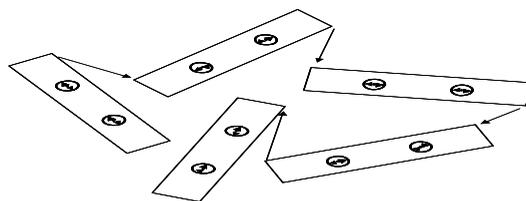


**Figura 2.** Esquema de reloj de 1 m de diámetro. Doce posiciones. 12 horas corresponde con norte magnético y el centro está marcado magnéticamente y georeferenciado

En el primer muestreo, realizado en el año 1999, se colectaron muestras en incrementos de profundidad de 15 cm, los puntos que se marcaron como las 12 y las 6 horas, o sea el norte y sur. En los muestreos posteriores se tomarán muestras siguiendo el esquema horario, esto es, el segundo 2003 se hará en los puntos correspondientes a las 1 y 7 horas, el tercero a las 3 y 8 horas y así sucesivamente.

### Muestreo de suelo y raíces en parcelas con bosque y cultivos permanentes

En cada sistema de vegetación natural (bosque) y en los cultivos permanentes, se seleccionaron cinco parcelas de 100 m<sup>2</sup> (25 x 4 m) al azar, las cuales se ubicaron con orientación aleatoria dentro del área de influencia de cada sistema. Para establecer la posición de las parcelas una de sus esquinas se georeferenció y además se establecieron los rumbos respectivos con respecto a un punto permanente en el campo, esto permite georeferenciar tanto las esquinas de la parcela como los centros de cada reloj. En cada parcela se ubicaron, de manera sistemática, los relojes, como se muestra en la Figura 3.



**Figura 3.** Distribución ejemplificada de las parcelas y los relojes en los sistemas vegetales y de cultivo permanente.

El muestreo de la parte subterránea en ambos casos se realizó hasta una profundidad de 105 cm, en incrementos de 15 cm, con barrena cilíndrica 4.77 cm de diámetro 19 cm de largo, provista de un martinete que aplica una fuerza similar en cada golpe. Las muestras de suelo fueron colocadas en bolsas de plástico y llevadas al laboratorio, existiendo la opción de llevar cada muestra en una camisa de plástico que se le coloca internamente al cilindro. Este procedimiento permite simultáneamente: extraer las muestras de suelo para análisis de C, estimar la biomasa radical en cada incremento de profundidad y calcular la densidad aparente de cada incremento, dato indispensable para el cálculo del C acumulado en el suelo.

### Procesamiento de las muestras y separación de la biomasa de raíces

Las raíces gruesas y finas visibles a simple vista, de cada muestra de suelo, al igual que las piedras, gravas y residuos de vegetales y animales no descompuestos, fueron aisladas manualmente en el laboratorio y pesadas por separado. El suelo remanente se colocó a secar al aire en platos desechables de plástico y luego se le

determinó el contenido de humedad para calcular la masa efectiva de suelo en el volumen colectado. Las raíces se secaron a 72 °C para calcular la biomasa radical de cada tratamiento y se les calculó su densidad media, al igual que a las piedras y gravas. Este dato fue empleado para hacer los ajustes de volumen antes del cálculo de la densidad aparente. Al final del primer año, se repitió el muestreo de raíces en las parcelas con cultivos agrícolas anuales y mixtos hasta una profundidad de 30 cm.

Las muestras de suelo de la primera colecta se emplearon para los análisis de carbono orgánico, como se explica más adelante.

### Densidad aparente

Los cálculos de la cantidad de carbono capturado requieren de la medición exacta de la densidad aparente del suelo. Por lo tanto, la integridad científica de esta investigación se basó en la conservación de la masa total de suelo obtenida durante el muestreo de terreno hasta el pesado de la muestra en el laboratorio. La masa de suelo seca al horno no consideró el peso de piedras, fragmentos de plantas y animales que no pasaron el tamiz de 2 mm. El volumen de suelo muestreado se corrigió por el volumen ocupado por piedras y raíces, con valores calculados de densidades de 2.4 y 0.3 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente.

### Método estándar para el análisis químico del carbono

Las muestras de suelo recibidas a su llegada al laboratorio, se registraron, se procesaron y prepararon para el análisis químico de acuerdo al esquema preestablecido. Las muestras secas de suelo se almacenaron en envases plásticos con tapa, se etiquetaron y se guardaron hasta el momento del análisis.

La determinación del contenido de carbono orgánico (CO) se hizo por combustión seca en un analizador automático de carbono Shimadzu TOC 5000-A. Una submuestra de 5 g del suelo seco al aire se molió durante 3 a 4 min en un molino mecánico de ágata hasta que prácticamente toda la muestra pasase por la malla 100. Una parte de esta muestra se secó a 105 °C para determinar su contenido de humedad base peso seco antes del análisis de carbono orgánico. Los suelos con que se trabajó tenían pH cercanos a 4.8 y carecían de C inorgánico, por lo que no fue necesario realizar correcciones por este tipo de carbono.

### Resultados y Discusión

El C acumulado en las raíces y en el suelo mineral, a dos profundidades (0 a 30 y 0 a 105 cm) en cada sistema de vegetación estudiado, es presentado a continuación por microcuenca. La diferenciación por profundidad se hizo para tener una idea preliminar de la contribución que hacen las raíces profundas a la acumulación total de carbono. El número de repeticiones consideradas para el cálculo de la media no fue el mismo en el caso de la profundidad 0 a 30, que en la profundidad 0 a 105 cm. En muchos lugares no fue posible coleccionar muestras en todo el perfil. El dato de C en la biomasa radical en los primeros 30 cm sirve como base de comparación uniforme entre los sistemas de vegetación de las microcuencas de las tres regiones.

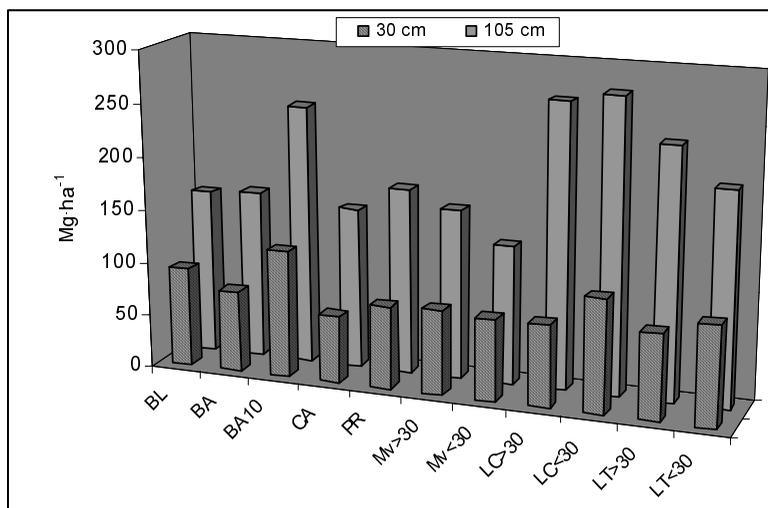
### Región Mazateca

En el Cuadro 1 (página siguiente) se muestra el C acumulado, en dos profundidades, tanto en las raíces como en el suelo, para los sistemas de vegetación representativos de la microcuenca de la región Mazateca.

El C presente en la capa 0 a 30 cm (raíz + suelo) en esta microcuenca es, en general, del orden 50 % o un

**Cuadro 1.** Carbono acumulado en las raíces y el suelo mineral, a 0 a 30 cm y 0 a 105 cm de profundidad, en la región Mazateca.

| Componente               | Sistemas Naturales |               |               | Sistemas Agrícolas |               |               |               |               |               |               |               |
|--------------------------|--------------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                          | BL                 | BA            | BA10          | Permanentes        |               | Mixtos        |               | Anuales       |               |               |               |
|                          |                    |               |               | CA                 | PR            | Mv>30         | Mv<30         | LC>30         | LC<30         | LT>30         | LT<30         |
| Mg.ha <sup>-1</sup>      |                    |               |               |                    |               |               |               |               |               |               |               |
| Profundidad hasta 30 cm  |                    |               |               |                    |               |               |               |               |               |               |               |
| Raíz                     | 2,26               | 2,02          | 3,16          | 4,59               | 1,11          | 0,97          | 2,76          | 1,32          | 2,83          | 0,86          | 4,90          |
| Suelo                    | 91                 | 74            | 117           | 58                 | 76            | 79            | 74            | 76            | 104           | 80            | 89            |
| <b>Total</b>             | <b>93,56</b>       | <b>76,33</b>  | <b>120,27</b> | <b>63,08</b>       | <b>77,59</b>  | <b>80,18</b>  | <b>76,58</b>  | <b>77,46</b>  | <b>106,67</b> | <b>80,65</b>  | <b>94,05</b>  |
| Profundidad hasta 105 cm |                    |               |               |                    |               |               |               |               |               |               |               |
| Raíz                     | 3,48               | 2,49          | 4,07          | 4,00               | 1,34          | 1,12          | 2,93          | 1,40          | 3,13          | 1,27          | 5,34          |
| Suelo                    | 152                | 156           | 240           | 148                | 174           | 158           | 128           | 266           | 273           | 235           | 195           |
| <b>Total</b>             | <b>155,35</b>      | <b>158,88</b> | <b>244,32</b> | <b>151,66</b>      | <b>175,25</b> | <b>159,39</b> | <b>131,14</b> | <b>267,02</b> | <b>276,06</b> | <b>235,94</b> | <b>200,35</b> |



**Figura 4.** Resultados de la cantidad de carbono del suelo mineral en los sistemas naturales y agrícolas, obtenido a dos profundidades 0-30 y 0-105 cm en la región Mazateca

poco menos, que el que se acumula a 105 cm de profundidad. En los sistemas agrícolas anuales, la diferencia entre las dos profundidades es mayor, que en el resto de los sistemas. El mayor aporte a este almacén subterráneo lo realiza el suelo mineral, la contribución de las raíces es mínimo.

La Figura 4 muestra como varía el C acumulado en el suelo mineral en los diferentes sistemas de vegetación. Se aprecia que hubo una gran diferencia del C acumulado en el suelo a la profundidad de 0 a 105 cm, entre los sistemas naturales y los agrícolas anuales. Sólo BA10 rebasó los 200 Mg ha<sup>-1</sup>, en cambio todos los sistemas agrícolas fueron mayores a ese valor.

El resultado que parece más interesante es que el mayor aporte al C del componente subterráneo de los sistemas de vegetación estudiados, independientemente de que se trate de sistemas agrícolas o forestales, la hizo el suelo. La contribución de las raíces al C de este componente del sistema fue mínima. Estos datos sugieren que en los trabajos de captura de C en suelos de ladera de zonas intertropicales, se le debe prestar mayor atención a este componente. Ellos representan el almacén de C más grande del ciclo y la manera como participan en los procesos que aportan o sustraen CO<sub>2</sub> de la atmósfera no es muy claro. El contar con un método estandarizado permite ahora hacer comparaciones mucho más confiables de los cambios que experimenten estos compartimentos.

### Región Cuicateca

Los almacenes de C subterráneo de los sistemas de la región Cuicateca se muestran en el Cuadro 2. En términos aportado por las raíces del bosque de encino (BE) y la pradera (PR) fueron 14 y 6 Mg.ha<sup>-1</sup>, respectivamente, un valor superior a cualquiera de los sistemas de vegetación estudiados en la región Mazateca. En todos los casos, la mayor proporción de C de las raíces fue aportada por el almacén de la profundidad de 0-30 cm, la contribución de las raíces de la parte más profunda del perfil fue insignificante, aún en los casos señalados como excepcionalmente altos.

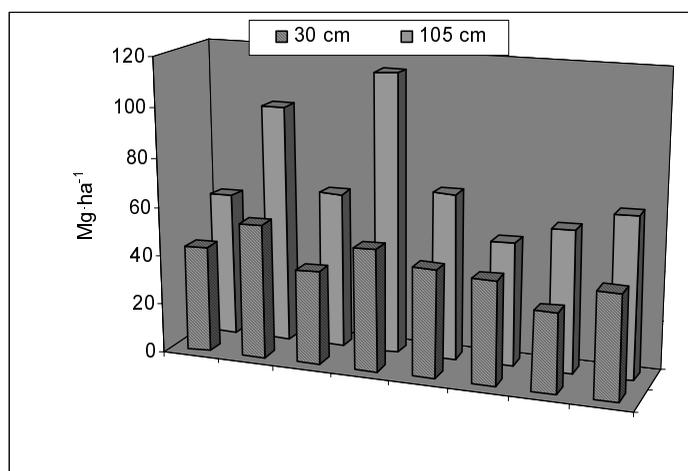
El C contenido en las raíces de los sistemas agrícolas mixtos y anuales fue menor, en general, a 1 Mg.ha<sup>-1</sup>; sólo una parcela, la con labranza de conservación, tuvo una acumulación de cerca de 2 Mg.ha<sup>-1</sup> de C, lo cual constituyó una excepción.

Es interesante hacer notar que cuando el aporte relativo de C de las raíces incrementa, el del suelo disminuye. Este fenómeno no tiene una explicación clara.

La cantidad de C almacenado en el suelo mineral se muestran en la Figura 5. En general, más del 50 % del C total encontrado en el suelo, se encuentra en la capa de 0 a 30 cm.

**Cuadro 2.** Carbono acumulado en las raíces y el suelo mineral, a 0 a 30 cm y 0 a 105 cm de profundidad, en la región Cuicateca.

| Componente               | Sistemas Naturales |              | Sistemas Agrícolas |               |              |              |              |              |
|--------------------------|--------------------|--------------|--------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                          | BE                 | PR           | Mixtos             |               | Anuales      |              |              |              |
|                          |                    |              | Mv(M)              | Mv(G)         | LC(M)        | LC(G)        | LT(M)        | LT(G)        |
| Mg.ha <sup>-1</sup>      |                    |              |                    |               |              |              |              |              |
| Profundidad hasta 30 cm  |                    |              |                    |               |              |              |              |              |
| Raíz                     | 13.92              | 5.44         | 0.65               | 1.00          | 1.86         | 1.06         | 0.58         | 0.60         |
| Suelo                    | 29.22              | 49.22        | 37.32              | 48.59         | 42.05        | 41.11        | 31.62        | 41.85        |
| <b>Total</b>             | <b>43.14</b>       | <b>54.66</b> | <b>37.97</b>       | <b>49.58</b>  | <b>43.91</b> | <b>42.17</b> | <b>32.20</b> | <b>42.45</b> |
| Profundidad hasta 105 cm |                    |              |                    |               |              |              |              |              |
| Raíz                     | 14.33              | 6.18         | 0.67               | 1.07          | 1.94         | 1.06         | 0.60         | 0.63         |
| Suelo                    | 44.57              | 90.98        | 62.84              | 112.82        | 65.61        | 49.10        | 57.25        | 65.08        |
| <b>Total</b>             | <b>58.90</b>       | <b>97.16</b> | <b>63.51</b>       | <b>113.90</b> | <b>67.55</b> | <b>50.16</b> | <b>57.85</b> | <b>65.71</b> |

**Figura 5.** Resultados de la cantidad de carbono presente en el suelo mineral en los sistemas naturales y agrícolas, obtenido a dos profundidades 0-30 y 0-105 cm en la región Cuicateca.

### Región Mixe

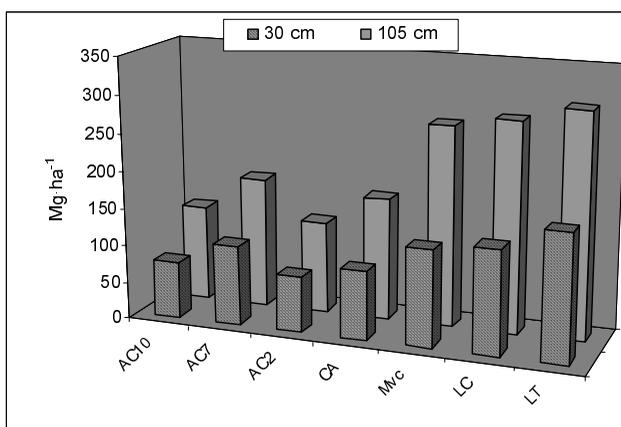
El C almacenado en las raíces y el suelo mineral por los sistemas de vegetación de la región Mixe, se encuentran en el Cuadro 3. Al igual que en las microcuencas anteriores, se observa aquí, que el aporte de las raíces al C almacenado en el perfil es pequeño y que el gran componente del C almacenado subterráneamente es el suelo mineral, así como también, que el C que aportan las raíces es el de las que se encuentran entre 0 y 30 cm. En contraste casi el 50 % del C del suelo mineral se encuentra a esa profundidad.

En esta microcuenca destaca, que la cantidad de C del suelo mineral en la profundidad 0 a 30 cm, en los

sistemas agrícolas, fue mayor que en los sistemas naturales o acahuales (Figura 6). Cabe mencionar que las parcelas con tratamientos agronómicos ya habían sido cultivadas con anterioridad, preferentemente con maíz, y que esta especie tiene un sistema radical bastante profundizador que pudiera explicar este hecho. Sin embargo, esta observación requiere de mayor análisis porque no es común que los suelos cultivados contengan más C acumulado que los suelos de los sistemas naturales degradados

**Cuadro 3.** Carbono acumulado en las raíces y el suelo mineral, a 0 a 30 cm y 0 a 105 cm de profundidad, en la región Mixe

| Componente   | Sistemas Naturales       |               |               | Sistemas Agrícolas |               |               |               |
|--------------|--------------------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
|              | AC10                     | AC7           | AC2           | Permanentes        | Mixtos        | Anuales       |               |
|              |                          |               |               | CA                 | Mvc           | LC            | LT            |
|              | Mg. ha <sup>-1</sup>     |               |               |                    |               |               |               |
|              | Profundidad hasta 30 cm  |               |               |                    |               |               |               |
| Raíz         | 7.15                     | 4.05          | 3.09          | 3.41               | 1.67          | 3.33          | 1.93          |
| Suelo        | 68.38                    | 101.84        | 71.87         | 88.92              | 127.80        | 136.30        | 167.14        |
| <b>Total</b> | <b>75.53</b>             | <b>105.89</b> | <b>74.95</b>  | <b>92.32</b>       | <b>129.47</b> | <b>139.64</b> | <b>169.07</b> |
|              | Profundidad hasta 105 cm |               |               |                    |               |               |               |
| Raíz         | 7.76                     | 5.14          | 4.03          | 4.00               | 1.93          | 3.91          | 2.29          |
| Suelo        | 120.38                   | 169.34        | 119.16        | 159.67             | 265.97        | 278.14        | 298.03        |
| <b>TOTAL</b> | <b>128.13</b>            | <b>174.48</b> | <b>123.19</b> | <b>163.67</b>      | <b>267.90</b> | <b>282.05</b> | <b>300.32</b> |



**Figura 6.** Resultados de la cantidad de carbono del suelo mineral en los sistemas naturales y agrícolas, obtenido a dos profundidades 0-30 y 0-105 cm en la región Mixe.

El hecho de que en las regiones Mazateca y Mixe la cantidad de carbono presente en el suelo de las parcelas de los sistemas agrícolas anuales, sea superior a la cantidad de carbono presente en los sistemas de vegetación forestal, se debe a que los suelos son más profundos y la pluviometría es mayor, lo cual hace que la biomasa que se pueda producir allí, y consecuentemente la translocación al suelo sea mayor.

Por otro lado los relativamente bajos contenidos de C en los sistemas con vegetación forestal, principalmente los bosques de liquidámbar, de encino y de aile en la región Mazateca, probablemente tuvieron en el pasado uso agrícola intenso y fueron abandonados por su degradación, lo cual explicaría su empobrecimiento actual y se han convertido en bosque secundarios con

dominancia de una determinada especie, después de haber sido acahuales.

## Conclusiones

■ La metodología establecida para determinar la cantidad de C presente en diferentes sistemas naturales y agrícolas, permitió hacer comparaciones confiables entre sistemas, microcuencas y profundidades, así como realizar futuras mediciones en los mismos lugares cada vez para comparar la capacidad de secuestro de carbono por los sistemas considerados.

■ El gran almacén de C en el componente subterráneo de los sistemas de vegetación es el suelo

mineral. La contribución de las raíces al total del C acumulado es baja (inferior al 5 %).

■ La mayor cantidad de C asociado a las raíces se encuentra en la profundidad de 0 a 30 cm del perfil.

■ Los sistemas agrícolas contienen mayor cantidad de C en el suelo, que los forestales secundarios degradados que se encuentran en la zonas de laderas del sureste mexicano.

■ Hubo una relación entre la profundidad del suelo y la cantidad de C que se puede acumular.

■ Las regiones Mixe y Mazateca tienen mayor potencial para capturar C en el suelo que la Cuicateca.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Global Environment Facility (GEF), al Banco Mundial (BM), a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA) al Gobierno del Estado de Oaxaca y a todas las personas que a través de sus esfuerzos de coordinación y trabajo colaboraron a la realización de esta investigación.

## Literatura citada

- Andrasko, K. 1990. El recalentamiento del globo terráqueo y los bosques: estado actual de los conocimientos. *Unasylva* 163(41):3-11.
- Bouwman, A. F. and R. Leemans, 1995. The role of forest soil in the global carbon cycle. pp. 503-525. *In* Mc Fee, W. W. and M. Kelly [Eds.] Carbon forms and functions in forest soils. SSSA. U.S.A. 594 p.
- Brosius, Felix. 1998. SPSS 8.0: Professionelle Statistik unter Windows, Bonn.
- Colegio de Postgraduados. 2001. Documento de la Tercera Reunión del Comité Técnico de Coordinación y Seguimiento del Proyecto Manejo Sustentable de Laderas. Oaxaca, México 30 de Marzo de 2001. 84 p.
- Couzin, J. 1999. Landscape changes make regional climate run hot and cold. *Science* 283:317-319.
- De Jong, B. H. J.; Tipper, R. and Taylor, J. 1997. A framework for monitoring and evaluating carbon mitigation by farm forestry projects: example of a demonstration project in Chiapas, México. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2:231-246.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler and J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263:185-190.
- Estrada, P. M. 1999. El cambio climático y sus efectos. *Notas Revista de información y análisis INEGI*. No. 8:45-52.
- Etchevers, J. D., M. Acosta, C. Monreal, K. Quednow y L. Jiménez. 2001. Los *stocks* de carbono en diferentes compartimientos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. En este volumen.
- Figueroa, R. O. L. 1999. Potencial de innovación tecnológica entre agricultores de tres regiones étnicas del estado de Oaxaca. Tesis de Maestría. Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 269 p.
- Fosberg, M. A.; L. A. Joyce and R. A. Birdsey. 1992. Global change and forest resources: modelling multiple forest resources and human interactions. pp. 235-251. *In* Reilly, J. M. and M. Anderson [Eds.] Economics issues in global climate change in agriculture, forestry and natural resources. Westview Press. Oxford. 460 p.
- IPCC, 2001. Summary for policymakers. A report of working group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (<http://www.ipcc.ch/pub/spm22-01.pdf>. Julio 31, 2001)
- IPCC. 1997. Impactos regionales del cambio climático: evaluación de la vulnerabilidad. Informe especial del Grupo de Trabajo II del IPCC.
- Kotto-Same, J., P. L. Woomer, A. Maukam, and L. Zapfpack. 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of humid forest zone in Cameroon. *Agriculture Ecosystem and Environments* 65: 245-256.
- Kyrklund, B. 1990. Cómo pueden contribuir los bosques y las industrias forestales a reducir el exceso de anhídrido carbónico en la atmósfera. *Unasylva* 163(41):12-14.
- Masera, R. O.; M. R. Bellon and G. Segura. 1995. Forest management options for sequestering carbon in México. *Biomass and Bioenergy* 8(5):357-367.
- Masera, R. O.; M. J. Ordóñez and R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35:265-295.
- Monreal, C. M.; H. Dinel; M. Schnitzer; D. S. Gamble and V. O. Biederbeck. 1997. Impact of carbon sequestration on indicators of soil quality as influenced by management in sustainable agriculture. Accepted in *Advances in Soil Science* (1997).
- Murray, B. C.; S. P. Pringle; R. A. Birdsey and R. N. Sampson. 2000. Carbon sinks in the Kyoto Protocol: Potential relevance for US forests. *Journal of Forestry* 98(9):6-11.

- Schulze, E. D.; Ch. Wirth and M. Heimann. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289 (5487):2058-2059.
- Soroos, M. S. 1998. Preserving the atmosphere as a global commons. *Environment* 40(2):7-13, 32-35
- Tans, P. P.; I. Y. Fung and T. Takahashi. 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO<sub>2</sub> budget. *Science* 247:1431-1438.
- Thomas, R. K.; N. Nicholls and G. Jonathan. 1997. The coming climate. *Scientific American* 54-59.
- U. S. Department of Energy. 1999. Carbon sequestration state of the science. [http://www.fe.doc.gov/coal\\_power/sequestration/html](http://www.fe.doc.gov/coal_power/sequestration/html)
- Waring, R. H.; J. D. Aber; J. M. Melillo and B. Moore III. 1986. Precursors of change in terrestrial ecosystems. *BioScience* 36(7):433-438.
- Watson, R. T. 2001. The carbon cycle- policy nexus. COP-6Bis, July 17 2001, Bonn, Germany. (<http://www.ipcc.ch/press/present.htm>.. August 14, 2001)
- Woomer, P. L. and C. A Palm. 1998. An approach for estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. No publicado.

## Cuantificación del Carbono Secuestrado por Algunos SAF's y Testigos, en Tres Pisos Ecológicos de la Amazonía del Perú.

D. Callo-Concha<sup>\*</sup>, L. Krishnamurthy<sup>\*\*</sup> J. Alegre<sup>\*\*\*</sup>

### Resumen

En la región amazónica del Perú y durante el segundo semestre del 2000, evaluamos los volúmenes de carbono secuestrado en seis tratamientos, sistemas agroforestales y/o sistemas de uso de la tierra: bosque primario, bosque secundario, café bajo sombra, silvopastura, pastura y huerto casero en tres variantes ecológicas (repeticiones), fragmentando el muestreo en: a) biomasa arbórea, b) biomasa herbácea, c) hojarasca y d) varios estratos de suelo.

En lo que se refiere a carbono total, el tratamiento parámetro: bosque primario, reteniendo 465,8 t C ha<sup>-1</sup>, supera en 58% a los SAF's: huerto casero y café + sombra; en 74,3% al cuarto, SAF silvopastura y 80% al otro testigo extremo: pastura. Sin embargo todos éstos, más el bosque de regeneración, son estadísticamente iguales e inferiores al bosque primario ( $p < 0,01$ ).

Resultó sumidero estable ( $p < 0,01$ ) y considerable, el suelo. Retiene en casi todos los casos -a excepción del bosque primario - más de la mitad del carbono total. Existe una proporcionalidad inversa entre los sumideros arbóreo y edáfico, función de su grado de cobertura arbórea; los aportes de biomasa herbácea y arbustiva (fresca y hojarasca), son pobres, fluctuando entre el 1 y 2% y los provenientes de árboles muertos, considerables pero oscilantes en los tratamientos b. primario, b. secundario y SAF café+sombra. Las diferencias de carbono secuestrado se deben exclusivamente a la proporción de la cobertura otorgada por la biomasa arbórea ( $p < 0,05$ ).

**Palabras clave:** sistemas agroforestales, sistemas de uso de la tierra, secuestro de carbono.

### **Carbon quantification by some agroforestry systems and parameters in three ecological sites of the Peruvian Amazonia**

#### **Abstract**

*In the Peruvian Amazonia during the second semester of 2000, we evaluated the volumes of carbon sequestered by six agroforestry systems and/or land use systems: primary forest, regeneration forest, coffee+shade, pasture+trees, pasture and homegarden in three ecological situations (blocks). We considered for the total sample, a) tree biomass, b) herbaceous and arbustive biomass, c) litter and d) soil.*

*Regarding the total carbon, the parameter primary forest stored 465.8 t C ha<sup>-1</sup> and exceeds by 58% the treatments: homegarden and coffee+shade, by 74.3% to the fourth: pasture+trees and 80% to the other parameter, pasture. However, those ones plus regeneration forest are statistically similar and less than the primary forest. ( $p < 0.01$ ).*

*The soil was the most stable ( $p < 0.01$ ), it retained in all cases -except primary forest- more than half of the total carbon. The increments are proportionally inverse between the tree and the soil sinks, it depends on the tree cover with which they count; the contributions of the rest of vegetative biomass (herbs, shrubs and litter) vary in 1 to 2%; the provided for death trees are considerably high but changeable in treatments: primary forest, regeneration forest and coffee+shade. So, the differences depend exclusively on the proportion of the arboreal biomass ( $p < 0.05$ ).*

**Key words.** agroforestry systems, land use systems, carbon sequestration.

---

\* Programa de Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

\*\* Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible

\*\*\* International Centre for Research in Agroforestry

## Introducción

A fines de los '70 el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y luego la Sociedad Mundial de Meteorología (SMM), alertan sobre drásticas variaciones climáticas [UNEP y GMS, 1992], las que serían consecuencia de la gradual y creciente acumulación de «gases de efecto de invernadero» (GEI) en la atmósfera, provenientes principalmente de la actividad industrial y deforestación masiva [IUCN y PNUMA, 1995]. La presencia de estos gases y su permeabilidad diferencial a las radiaciones, redundaría en un calentamiento biosférico acumulativo [UNEP y GMS, 1992; IUCN y PNUMA, 1995]. Se han modelado algunos escenarios, uno extremo, señala que para el 2100 habrían incrementos de 3,5 °C en la temperatura media, 0,65 m en nivel medio del mar, de 7 a 11 % en las tasas de precipitación-evaporación, etc. [IPCC, 1995]. Además de innumerables consecuencias biofísicas y socioeconómicas, como: migración, suplantación, padecimiento y extinción de especies; epidemias y pandemias agrícolas y humanas; sequía, erosión y desertificación de suelos; variaciones en los patrones, producción y productividad de agroecosistemas; etc. [UNEP y GMS, 1992; IPCC, 1995; Woodwell cit. por Parlamento Latinoamericano, *et. al.*, 1998].

En la reunión de Río de Janeiro, Brasil: Eco-92, se firmó *La Convención Marco sobre el Cambio Climático*, rubricado por 162 líderes de estado y ampliamente esperado por esferas científicas, políticas y sociales [IUCN y PNUMA, 1995; Framework Convention on Climate Change, 1998]. Más que normativa, aperturaba un espacio de discusión que la temática ameritaba en la Agenda 21 [UNEP, 1996]. Las medidas a implementar, son producto de investigaciones multidisciplinarias y emitidas en informes periódicos por el IPCC, Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático [IPCC, 1995], el ala política macro es dada por la Conferencia de las Partes (CdP), foro que en reuniones periódicas, propone y monitorea la implementación de las sugerencias técnicas, siendo algunos de sus productos: el Mandato de Berlín '93 y el Protocolo de Kyoto '97, [CMNUCO, 1997; Parlamento Latinoamericano, *et. al.*, 1998]. Existen además varios otros grupos de discusión, financiamiento y acción relacionados: el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF), la Alianza de Pequeños Estados Insulares (SIDS), la Sociedad Mundial de Meteorología (SMM), el

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), entre los más relevantes [IPCC, 1995; UNEP, *et al.*, 1999].

Alternativamente, hay confluencia mundial, en que es primordial la generación de nuevos paradigmas de desarrollo y conducta (individuales y sociales) sustentados en preceptos de sostenibilidad y equidad, este particular punto de urgente aplicabilidad [CMNUCO, 1997]. Las líneas sugeridas consideran: inventarios de emisiones, programas de mitigación, investigación de base, promoción de la investigación, transferencia tecnológica, promoción y protección de sumideros, intercambio de información y participación ciudadana [Parlamento Latinoamericano, *et al.*, 1998]. Políticamente, en Kyoto '97 se propusieron medidas concretas, como la reducción de emisiones a niveles precedentes, generación de mercados internacionales, facilitamiento de conocimiento, información, tecnología y financiamiento norte-sur [Parlamento Latinoamericano, *et al.*, 1998], mas la respuesta ha sido desigual, al punto que el protocolo permanece aún sin ser ratificado<sup>1</sup>. Han resultado más exitosas las negociaciones de cuotas de emisión, que involucran no solo estados sino organizaciones privadas, que intermedien en este «mercado de derechos negociables de emisiones»; inclusive se ha establecido una tasa de valuación, «el dióxido de carbono equivalente» [Ortiz *et al.*, 1998; Parlamento Latinoamericano, *et al.*, 1998].

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), con 344 000 ppbv<sup>2</sup> -más de 200 veces la concentración del siguiente GEI, metano- y una tasa de incremento anual de 0,4%, es el principal gas de efecto de invernadero [UNEP y GMS, 1992]. Su «secuestro», reincorporación al sumidero biosférico, se ha contemplado como un factor clave en la mitigación del calentamiento global. Los mecanismos más espectantes, a) retención en el suelo y biomasa, gracias al intercambio gaseoso de las plantas y b) por vegetales marinos en un proceso similar. En este espectro cobran importancia las grandes fitomasas y sus capacidades fotosintéticas, y las demás alternativas de uso de la tierra, como sumideros potenciales. El estudio de ecosistemas y su potencial en el secuestro de carbono se sustenta en ello.

La Agroforestería, como paradigma tecno-productivo, oferta ventajas comparativas en relación a algunos otros sistemas de uso de la tierra: elevación de réditos globales,

---

<sup>2</sup> ppbv, partes por millón por volumen, equivalente a 0,034% del volumen atmosférico total.

<sup>1</sup> Para ser válido exige sea firmado por al menos el 55% de países que a su vez sumen al menos el 55% de las emisiones de los países desarrollados. No dado esto, el protocolo jurídicamente no es vigente [Segura, 1999]

**Cuadro 1.** Volúmenes de carbono secuestrado por varios SUT's

| Sistema de Uso de la Tierra               | C secuestrado t ha <sup>-1</sup> |
|---|----------------------------------|
| Bosque primario                           | 300**                            |
| Bosque secundario (15 años)               | 159.88*                          |
| Bosque maderable                          | 100 a 200**                      |
| Bosque primario intervenido               | 157.46*                          |
| Bosque recientemente quemada              | 96.52*                           |
| Terrenos en cambio de uso y rotación      | -88 a 25**                       |
| Bosque secundario (3 años)                | 57.02**                          |
| Campo de plátano                          | 50.14*                           |
| Sistemas agroforestales                   | 25 a 30**                        |
| Rotaciones                                | -40 a 60**                       |
| Campo de maíz                             | 45.18*                           |
| Plantación de árboles                     | 11 a 61**                        |
| Campo de yuca                             | 37.84*                           |
| Pastura                                   | 36.3*                            |
| Cultivos de barbecho corto (menos 5 años) | -5**                             |
| Pasturas y praderas                       | -3**                             |

**Fuente:** Determinación de biomasa y carbono en los principales sistemas de uso del suelo en la zona de Campo Verde. [Barbarán, 1998]\*y Elaborado en base a ASB climate change working group report. Final report, phase 2 [Palm *et al.*, 1999]\*\*

producción y productividad biofísica, provisión de argumentos socioeconómicos que releven su versatilidad circunstancial [Krishnamurthy y Avila, 1999] y alternativa a los sistemas tradicionales de agricultura migratoria RTQ [ICRAF, 1996, 1998; Alegre *et al.*, en prensa]. Se demanda ahora, explorar su factibilidad (la de los SAF's) para secuestrar carbono, en un marco amplio, transdisciplinario y de compromiso colectivo.

Se ha preconcebido el potencial de los SAF's para secuestrar carbono, sustentándolo en argumentos teóricos, dado su relativo mayor volumen de biomasa vs. monocultivos [Nair, 1993; Krishnamurthy y Avila, 1999]. Mas la evidencia científica es aún escasa y la información dispersa [Schroeder, 1994].

Desde este particular punto de vista, un SUT agrícola<sup>3</sup> se distingue de uno agroforestal, por sus períodos y volúmenes de carbono ciclado, que en el último varían entre 10 y 50 t ha<sup>-1</sup> [Kurstén y Burschel, 1993 cit. por López 1998]; de acuerdo al SAF que se trate, los extremos, inferior: linderos y cercos vivos aportarían de 3 a 25 t ha<sup>-1</sup>, los intermedios, «taungya» y huertos caseros, hasta 50 t ha<sup>-1</sup>, y más, los barbechos. Una purma de 15 años

por ej. puede acumular hasta 100 t ha<sup>-1</sup> [Brown y Lugo, 1990 cit. por López 1998]. Hay quienes sugieren un volumen medio de carbono secuestrado por los SAF's, igual a 95 t ha<sup>-1</sup> [Winjum, 1992 cit. por López 1998] y algunas otras posiciones (Cuadro 1).

Partimos de algunas premisas que parecen ser evidentes:

■ Premisa 1. «Los bosques tropicales retienen más carbono que otro ecosistema». Cuarenta y cuatro veces más biomasa que cualquier otro sistema, con incrementos de  $0.62 \pm 0.37$  t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> [Houghton, 1991 cit. por López; Phillips, 1998 cit. por Segura, 1999; Segura, 1999]. Sus radios de incremento anual varían de 1,1 a 2,1 t año<sup>-1</sup> [Segura, 1997], en consecuencia debe resaltarse la especial aptitud de la franja tropical, como sumidero de carbono atmosférico (cuadro 2) [Houghton, 1997 cit. por Palm *et al.* 1999]; se afirma que el trópico amazónico mantiene en promedio 160 t C ha<sup>-1</sup> [Barbarán, 1998].

■ Premisa 2. «Fijan más carbono los bosques secundarios y plantaciones jóvenes que los bosques primarios y/o maduros». Los primarios han alcanzado su clímax y «congelado» su capacidad de conversión de

<sup>3</sup> Los suelos agrícolas son capaces de sumir alrededor del 10% de las emisiones de CO<sub>2</sub> Subak, 2000].

**Cuadro 2.** Zona geoclimática y porcentaje relativo de carbono secuestrado

| Zona                  | C secuestrado (%) |
|-----------------------|-------------------|
| Tropical <sup>4</sup> | 80                |
| Templada              | 17                |
| Boreal                | 3                 |

**Fuente:** Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo [Trexler y Haugen, 1995 cit. por López, 1998]

carbono atmosférico a biomasa, mientras que los secundarios, intensifican los procesos de secuestro y liberación, por la aceleración y secuencialidad de sus ciclos [Ciesla, 1995 cit. por López, 1998; Ortíz *et.al* 1998], un barbecho puede eventualmente recuperar de 50 a 80% la proporción de carbono de un bosque primario [Palm *et.al*, 1999], de ahí el potencial de los barbechos, por la superficie que ocupan: 250 millones de ha [Lugo y Brown, 1993 cit. por López, 1998].

■ Premisa 3. «Entre la tercera parte y la mitad del carbono retenido por un SUT tropical (inclúyase bosques), se registra en el suelo» [Schroeder, 1994; Dixon *et.al*, 1994 cit. por López, 1998; Barbarán, 1998], como parece evidente los bosques secundarios desarrollan más

biomasa radicular que las plantaciones [Lugo, 1992 cit. por López, 1998], a profundidades superiores a un metro, los suelos forestales contienen más carbono que biomasa aérea, el 15% de este carbono se recicla en períodos de varios años hasta décadas [Nepstad *et.al*, 1994 cit. por López, 1998]. Aún cuando se afirma que en los trópicos subhúmedos el potencial de secuestro de carbono es sobre el suelo y no en él [Palm *et.al*, 1999] (Cuadros 3 y 4).

Así enfocamos la idea de desarrollar investigación en Agroforestería y sus potencialidades de secuestro de carbono *per-se*, para con ello: a) aportar a la plataforma de posibilidades de uso de la tierra más amigables con el ambiente, genéricamente y b) contribuir en el proyecto de estabilización climática, específicamente.

**Cuadro 3.** Porcentaje relativo de Carbono almacenado, secuencia: antes RTQ, después RTQ e instalación de pastura. Biomasa aérea, radicular y edáfica.

| Fuente de Carbono | Antes RTQ (200 t/ha) | Después RTQ (105 t/ha) | Pastura (28 t/ha) |
|-------------------|----------------------|------------------------|-------------------|
| B. aérea          | 75%                  | 45%                    | —                 |
| B. radicular      | 4%                   | 7%                     | 31%               |
| Edáfica           | 16%                  | 38%                    | 69%               |

**Fuente:** Impacts of forest conversion: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon Colony [Fujisaka, 1997]

**Cuadro 4.** Porcentaje relativo de carbono en el suelo, entre 0 y 20 cm. Varios SUT's, en relación a un bosque primario no disturbado.

| Sistema de Uso de la Tierra | Porcentaje |
|-----------------------------|------------|
| Barbechos largos            | 90 a 100   |
| Sistemas Agroforestales     | 80 a 100   |
| Pasturas                    | 80         |
| Barbechos cortos            | 65         |
| Pasturas degradadas         | 50 ó menos |

**Fuente:** Carbon Sequestration and Trace Emissions in Slash and Burn and alternative Land Uses in the Humid Tropics [Palm *et al*, 1999]

<sup>4</sup> Los trópicos preservan más de la mitad de los bosques de regeneración, y sufren alrededor del 20% de la deforestación planetaria [Trexler y Haugen, 1995 cit. por López, 1998].

**Cuadro 5.** Latitud y altitud media de las localidades del estudio

| Localidad   | Altitud media (msnm) | Coordenadas (Km)  |
|-------------|----------------------|-------------------|
| San Agustín | 1 600                | 412644X, 8982961Y |
| Previsto    | 600                  | 418953X, 8995058Y |
| Aguaytía    | 400                  | 444082X, 9001031Y |

**Fuente:** Base de datos Sistema de Información Geográfica, CIAT-Perú.

## Materiales y metodología

### *El sitio*

Esta investigación se condujo entre agosto y noviembre del 2000, en el Perú, departamentos de Ucayali y Huánuco, provincias de Padre Abad y Tingo María y tres zonas: San Agustín, Previsto y Aguaytía.

La franja estudiada involucra las tres ecozonas que emblemizan la amazonía peruana: a) ceja de selva, sobre 1000 m, lluvias superiores a los 4000 mm año<sup>-1</sup> (San Agustín), b) selva alta, entre 500 y 1000 m y precipitaciones de 2000 a 4000 mm año<sup>-1</sup> (Previsto) y c) selva baja, entre 0 y 500 m, generalmente llana e inundable (Aguaytía). Ecolimáticamente a corresponden a bosque húmedo tropical (BH-T), bosque húmedo premontano tropical (BH-PT) y bosque muy húmedo (BMH); con temperatura media anual de 26,6 °C, media máxima de 31,9 y media mínima de 21,6 y elevada humedad atmosférica, entre 65,5 y 94,7% y media anual del 78,5% [ONERN, 1978; Baldoceda, 1993; Videoriente, 1996].

### *Fundamento*

En la ruta fotosintética el carbono es secuestrado en la biomasa y después parcialmente incorporado al suelo, así su cuantificación se hace en estos dos recipientes mayores<sup>5</sup>. Luego, su consolidación resultará de la sumatoria definida por:

$$CT = CB^* + CS$$

donde

CT carbono total  
 CB carbono, biomasa  
 CS carbono, suelo

$$* CB = CAb + CAvHb + CH$$

donde

CB carbono, biomasa  
 CAb carbono arbóreo  
 CAvHb carbono arbustivo y herbáceo  
 CH carbono, hojarasca

### *Tratamientos*

En las tres ecozonas, reconocimos cinco prácticas agroforestales y un testigo parametrizable, estas debían corresponder:

- 1 Bosque primario (no intervenido, testigo). Da idea del volumen de carbono fijado por un bosque clímax.
- 2 Bosque secundario<sup>6</sup>. En regeneración, explotado. Evaluamos parcelas de alrededor 8 años en promedio.
- 3 Café bajo sombra. Sistemas que consideren como componente comercial al café y cultivo de sombra a alguna otra especie de mayor fuste. Fue requisito que el café estuviese en producción y aprovechamiento residual de la especie socia, no hubo homogeneidad entre las parcelas muestreadas.
- 4 Silvopastura. Generalmente árboles dispersos en zonas de pastoreo. Instalados o residuales del establecimiento de especies de utilidad financiera (post-barbecho), pero en todo caso aprovechables, sombra, combustible, forraje, etc.
- 5 Pastura. Consolida la última fase de cambio de uso de los barbechos. Ya instalados y en pleno aprovechamiento, los suelos están sujetos a constante carga animal. Forraje empleado, generalmente especies mejoradas o asociaciones de éstas.
- 6 Huerto casero. Cuyas consideraciones se definen en función a las necesidades familiares. Debía ser aledaño

<sup>5</sup> El muestreo de raíces para la cuantificación de carbono retenido se ha considerado [Fujisaka et.al, 1997; Barbarán, 1998], mas por resultar el método de muestreo deficiente y no significativo, de dejó de lado [Alegre, 1998; Palm et. al, 1999b]

<sup>6</sup> Bosque Secundario, «acahual» en México, «purma» en el Perú, «capoeira» en el Brasil, «tacotal» en Nicaragua; definida como la vegetación leñosa de carácter sucesional, en terrenos aprovechados por actividades humanas, de al menos 1 ha y 5 años desde el último cultivo. [CIFOR, 1998].

a la residencia familiar y satisfacer en alguna medida sus necesidades alimenticias, terapéuticas, de combustible, forraje, etc. y circunstancialmente generar réditos financieros.

Subrayemos que todos estos SUT's se sustentan en el largo plazo en esquemas de agricultura migratoria, sin arreglos espaciales ni disposiciones temporales definidos (mas que la secuenciación RTQ tradicional). Así los SAF's muestreados coinciden en su epistemología más que en detalles.

### Medición en campo

La metodología para estimar carbono retenido, corresponde fundamentalmente a Woomer y Palm, 1993 modificada por Palm y van Noordwijk, 1999, guías desarrolladas por Tropical Soil Biology and Fertility Programme [Alegre *et. al*, en prensa] y documentos internos de Alternative Slash and Burning [Palm *et. al*, 1999b].

#### 1. Biomasa Arbórea

Arboles entre 2,5 y 30 cm de DAP. Se marcaron parcelas de 4 x 25 m en las que se midió la altura (H)<sup>7</sup> y diámetro a la altura del pecho (DAP)<sup>8</sup> de los árboles vivos y parados muertos. Si se bifurcase por debajo de 1,3 m, se consideraran dos árboles diferentes. Para árboles caídos muertos, se tomara un diámetro representativo (o dos) y su largo.

En caso los árboles superen los 30 cm de diámetro, se tomarán las mismas medidas, mas se extrapolará la parcela a 5 x 100 m, superpuesta a la primera.

Debe nominarse además en todos los casos: los nombres locales de cada árbol, si es ramificado (R) o no (NR), índice de densidad de la madera de la especie (alta: 0,8 media: 0,6 o baja: 0,4) y si es palmera (P) o liana (L).

#### 2. Biomasa arbustiva y herbácea.

Se determinó al azar dos cuadrantes de 1 x 1 m, dentro de las subparcelas de 4 x 25 ó 5 x 100 m según se trate. En estas cortamos toda biomasa epigea fresca, procedente de arbustos, con menos de 2,5 cm de diámetro y hierbas. Obteniendo el peso fresco total (por metro cuadrado), y de éste, el peso fresco de una submuestra de valor arbitrario, enviada a laboratorio para secado.

#### 3. Biomasa seca (hojarasca)

Para cada parcela, dentro de los cuadrantes de 1 x 1 m, tomamos subcuadrantes de 0,5 x 0,5 m, en ellos pesamos la hojarasca acumulada (por 0,25 m<sup>2</sup>), y de ésta, una submuestra de valor arbitrario, enviada a laboratorio para secado.

#### 4. Muestreo de suelos y medición de densidad aparente

En los cuadrantes señalados para el muestreo de biomasa, se cavaron calicatas de 1 m de profundidad, definiendo en ellas los estratos: 0 – 0,1 m; 0,1 – 0,2 m; 0,2 – 0,4 m y 0,4 – 1,0 m. En cada uno, usando cilindros Uhland, se tomaron muestras para estimar la densidad aparente. Tomamos además muestras de en promedio 500 g, que se enviaron a laboratorio para la cuantificación de carbono total y análisis complementario: textura, nitrógeno, pH, bases intercambiables y acidez.

En suma se obtuvieron, 90 planillas de biomasa arbórea (alrededor de 2400 accesiones), 180 muestras de biomasa fresca arbustiva-herbácea y 180 muestras de hojarasca, 720 muestras de suelo para determinación de carbono y análisis químico y 720 para densidad aparente.

### Cálculos

**1. Biomasa arbórea.** Son varios los modelos diseñados para estimar los volúmenes de biomasa arbórea, todos indirectamente, por inferencia de sus principales medidas biométricas, generalmente altura, DAP, y densidad [CIFOR, *et. al*, 1998].

**1.1.** En la estimación de biomasa de árboles vivos y muertos en pie -la mayor parte- y su cálculo de carbono retenido, se sugieren el modelo de Palm, que se comenta la maximiza [Brown, 1997; Fujisaka *et. al*, 1997; Barbarán, 1998; Palm *et. al*, 1999; Ceijas, 1999; Palm, 2000].

$$BA = 0,1184 \text{ DAP}^{2,53}$$

donde,

|        |  |
|--------|--|
| BA     | biomasa arboles vivos y muertos de pie |
| 0,1184 | constante                              |
| DAP    | diámetro a la altura del pecho         |
| 2,53   | constante                              |

<sup>7</sup>Es usual el empleo de aparatos para medir indirectamente la altura; hipsómetro, eclímetro, clinómetro, etc. en todos los casos se mide dos ángulos, de elevación y depresión y la distancia al operador. Estimándose la altura por:  $H = d (\text{tg } a + \text{tg } b)$ ; H, altura; d, distancia; a, ángulo de elevación; b, ángulo de depresión.

<sup>8</sup>Medida directamente, empleando cinta diámetrica o forcípula, por convención se realiza a 1,3 m. del suelo.

- 1.2. Para árboles muertos caídos consideramos, [Cejas, 1999; Palm, 2000]

$$BAC = 0,4 DAP^2 L 0,25 J$$

donde,

|      |   |
|------|---|
| BAC  | biomasa arboles muertos caídos          |
| 0,4  | densidad (valor asumido por convención) |
| DAP  | diámetro a la altura del pecho          |
| L    | largo del árbol                         |
| 0,25 | constante                               |
| P    | pi, constante (3,1416)                  |

## 2. Contenido de carbono, biomasa.

$$CC = B 0,45$$

donde,

|      |   |
|------|---|
| CC   | contenido de carbono                                      |
| B    | biomasa vegetal   |
| 0,45 | constante (proporción de carbono, asumido por convención) |

## 3. Densidad aparente, suelo.

$$DA = PSN/VCH$$

donde,

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| DA  | densidad aparente                   |
| PSN | peso seco neto                      |
| VCH | volumen cilindro Uhland (constante) |

## 4. Volumen de suelo.

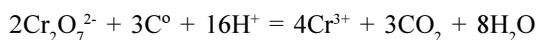
$$Vs = DA Ps$$

donde,

|    |                       |
|----|-----------------------|
| Vs | volumen de suelo      |
| DA | densidad aparente     |
| Ps | profundidad del suelo |

## Determinación de carbono orgánico en el suelo

Empleamos el Método de Nelson & Sommers. Oxidando las muestras de suelo con dicromato de cromo en presencia de ácido sulfúrico y calor y titulando luego con sulfato ferroso amoniacal. Estimando indirectamente el carbono orgánico almacenado [Anderson e Ingram, 1993]



## Análisis estadístico

Realizamos un ANOVA para BCA (bloques completamente aleatorizados) y comparación de medias a través de la prueba de Tukey. Tales análisis se condujeron empleando FAUANL ver. 2.0 [Olivares, 1990]. El modelo empleado se ajusta a,

$$y_{ijk} = m + t_i + d_j + e_{ijk}$$

donde,

|           |  |
|-----------|--|
| $y_{ijk}$ | k-ésima unidad de muestreo de la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento                          |
| m         | media  |
| $t_i$     | i-ésimo tratamiento  |
| $d_j$     | j-ésima repetición   |
| $e_{ijk}$ | error experimental en la k-ésima unidad de muestreo de la j-ésima repetición del i-ésimo tratamiento |

## Resultados y discusión

### Carbono arbóreo, árboles en pie.

Es claro y era predecible, que la densidad de árboles vivos en los bosques primarios debiera ser mayor a la de los restantes tratamientos. Sorprende que el huerto casero supere al bosque secundario en la densidad de árboles

**Cuadro 6.** Comparación de medias, carbono en árboles en pie ( $t ha^{-1}$ )

| Sistema de uso de la tierra | Carbono |                |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Bosque Primario             | 196,1   | a <sup>¶</sup> |
| Huerto Casero               | 77,4    | b              |
| Bosque Secundario           | 67,9    | b              |
| Café bajo sombra            | 45,4    | b              |
| Silvopastura                | 30,4    | b              |
| Pastura                     | 2,28    | b              |

Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a  $p < 0,05$ .

en pie, pero se justifica por la presencia de árboles cultivados de gran fuste y baja densidad, en relación a la gran densidad y pobre fuste, característica de los bosques de regeneración (secundarios), pues se trata de bosques de ocho años en promedio. En los tres casos restantes, hay proporcionalidad entre la densidad arbórea y los volúmenes de carbono secuestrados por los mismos. Nótese el caso de la silvopastura, donde la inclusión de árboles basta para incrementar considerablemente la proporción de carbono retenido.

**Carbono arbóreo, árboles caídos muertos.**

En un bosque primario, la elevada presencia de árboles caídos muertos (más de la tercera parte) es consecuencia de la fuerte dinámica de los ciclos naturales y su densidad proporcional acorde a la dinámica de regeneración del bosque, máxima en este caso. No debe descartarse algún grado de intervención, que pueda interpretarse como deforestación. En los demás tratamientos, el ordenamiento es función del diseño estructural del SAF y en cierta medida, el volumen de árboles caídos muertos predecible y sucesivo.

Que el tratamiento café bajo sombra supere al bosque secundario, lo que en teoría debiera invertirse, se interpreta por que en su dinámica temporal, correspondiente a la secuenciación RTQ, la plantación

continúa a la roza y los restos de esta aún persisten, mientras que un bosque secundario, al consolidarse ha sufrido procesos de reforestación sucesiva por períodos mayores y la presencia de árboles caídos a consecuencia de ello, es simplemente menor.

**Carbono arbustivo-herbáceo**

Era predecible la superioridad (de méritos y estadística en cierta medida) de los tratamientos pastura y silvopastura, por cualidades intrínsecas a su composición, aún cuando esa capacidad para generar biomasa es antropogénica (pastos cultivados). Llama la atención, la considerable diferencia entre los sistemas pastura y silvopastura, casi del 40 %, atribuible en primera aproximación al componente arbóreo, pero que no justifica en toda su medida. En los tratamientos siguientes: bosque secundario, bosque primario, café bajo sombra y huerto casero, el carbono aportado por la biomasa herbácea es menor, debido a la elevada densidad del dosel y mínima en los estratos inferiores, consecuencia del laboreo.

**Carbono hojarasca**

Se consideran superiores, estadísticamente, a los del primer grupo (a: bosque primario y bosque secundario),

**Cuadro 7.** Comparación de medias, carbono en árboles caídos (t ha<sup>-1</sup>)

| Sistema de uso de la tierra | Carbono |                |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Bosque Primario             | 167,0   | a <sup>†</sup> |
| Café bajo sombra            | 32,44   | b              |
| Bosque Secundario           | 13,8    | b              |
| Huerto Casero               | 6,25    | b              |
| Silvopastura                | 1,44    | b              |
| Pastura                     | 0,0     | b              |

Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a p < 0,05.

**Cuadro 8.** Comparación de medias, carbono arbustivo-herbáceo (t ha<sup>-1</sup>)

| Sistema de uso de la tierra | Carbono |                |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Pastura                     | 1,28    | a <sup>†</sup> |
| Silvopastura                | 0,91    | ab             |
| Bosque Secundario           | 0,78    | b              |
| Bosque Primario             | 0,75    | b              |
| Café bajo sombra            | 0,63    | b              |
| Huerto Casero               | 0,54    | b              |

Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a p < 0,05.

**Cuadro 9.** Comparación de medias, carbono hojarasca (t ha<sup>-1</sup>)

| Sistema de uso de la tierra | Carbono |                |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Bosque Primario             | 3,25    | a <sup>†</sup> |
| Bosque Secundario           | 2,57    | ab             |
| Café bajo sombra            | 1,70    | bc             |
| Huerto Casero               | 1,02    | c              |
| Pastura                     | 0,69    | c              |
| Silvopastura                | 0,65    | c              |

Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a  $p < 0,05$ .

**Cuadro 10.** Comparación de medias, carbono edáfico (t ha<sup>-1</sup>)

| Sistema de uso de la tierra | Carbono |                |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Café bajo sombra            | 113,54  | a <sup>†</sup> |
| Huerto Casero               | 110,51  | a              |
| Bosque Primario             | 98,78   | a              |
| Bosque Secundario           | 95,97   | a              |
| Pastura                     | 93,01   | a              |
| Silvopastura                | 86,38   | a              |

Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a  $p < 0,01$ .

**Cuadro 11.** Comparación de medias, carbono total (t ha<sup>-1</sup>)

| Sistema de uso de la tierra | Carbono |                |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Bosque Primario             | 465,84  | a <sup>†</sup> |
| Huerto Casero               | 195,73  | b              |
| Café bajo sombra            | 193,69  | b              |
| Bosque Secundario           | 180,99  | b              |
| Silvopastura                | 119,75  | b              |
| Pastura                     | 97,26   | b              |

Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a  $p < 0,01$ .

en relación a los del tercero (c: café bajo sombra, huerto casero, pastura y silvopastura); mientras que los del segundo (b: bosque secundario y café bajo sombra) fungen de enlace entre uno y otro. El orden de méritos, asigna una sucesión, función del grado de cobertura arbórea del SUT que se trate, pues como es evidente, la provisión de hojarasca es proporcional al aporte de biomasa foliar.

### **Carbono edáfico**

Es claro que la homogeneidad es provista por los aportes regulares de carbono edáfico. Recuérdese que en el muestreo de suelos se consideró un prisma de un metro de profundidad, generando un volumen hipotético

de 10 000 m<sup>3</sup>, entonces la diferencia (no estadística) a favor de café bajo sombra y huerto casero, podría ser consecuencia del laboreo; nótese además, que el aporte de las deyecciones del ganado, casos de pastura y silvopastura, no afecta significativamente el stock de carbono edáfico.

### **Carbono total**

Es evidente que el aporte que equilibra todos los tratamientos apreciados, corresponde al edáfico (cuadro anterior). No obstante ello, sus valores y diferencias son considerables, estas a favor del bosque primario y en desmedro de la silvopastura y pastura, especialmente en este último caso. También es de subrayar el perjuicio del

tratamiento bosque secundario, que desciende al cuarto lugar -a pesar de no alterar la interpretación por ser estadísticamente iguales-, mas debe explicarse por la alta y regular contribución edáfica.

### Carbono gestionable <sup>a</sup>

Se restaura el ordenamiento apreciado en carbono arbóreo, el más predecible: bosque primario, huerto casero, bosque secundario, café bajo sombra, silvopastura y pastura. Si bien no existe diferencia estadística, los tratamientos huerto casero, bosque secundario y café bajo sombra, cuantitativamente conforman un subgrupo de aportes muy regulares, y finalmente la silvopastura y pastura, con menores participaciones, especialmente la última.

### Carbono fragmentado

En el caso del bosque primario, el mayor volumen de carbono retenido se encuentra en la biomasa arbórea, sorprendentemente alta en árboles caídos muertos y en menor proporción en el suelo, consecuencia de la alta cuota de carbono arbóreo. Los aportes de carbono en fuentes de biomasa no arbórea (arbustiva, herbácea, hojarasca y edáfica), en suma no alcanzan la cuarta parte del volumen global.

Para el bosque secundario, el mayor aporte -al igual que en los demás sistemas- corresponde al carbono edáfico, en un porcentaje ligeramente superior al 50%, lo que debería ratificar la hipótesis complementaria 2. La proporción de árboles caídos, considerablemente baja

en relación a la del testigo y café bajo sombra, se explica en su dinámica de regeneración (explicado en un ítem anterior).

En el Café bajo sombra, el carbono edáfico es considerablemente superior en el rango medio, el de árboles caídos muertos relativamente alto por el asunto de la dinámica RTQ y la de árboles en pie, sorprendentemente menor en comparación a la de la silvopastura, no a causa de la densidad espacial sino más bien de la edad del sistema, que suele preservar individuos mayores y consecuentemente más robustos.

Para la silvopastura, una proporción de carbono es edáfico es altísima, casi 3/4 partes, en comparación a la cuarta parte de árboles en pie y más considerando que la presencia de árboles caídos muertos es bajísima y el aporte dado por herbáceas y arbustivas mínimo en contraste con el gran total.

Pastura. Casi el 96% del carbono es contribuido por el suelo, le siguen, árboles en pie, que en teoría debería ser nulo, tratándose de un sistema de uso de la tierra pastoril, pero que circunstancialmente toma vigencia por relictos, cercas vivas, árboles fuente de subproductos excepcionales, etc. La proporción superior, vs. los demás tratamientos, en aporte de carbono herbáceo y hojarasca no arbórea, se debe a la concepción del sistema.

En el tratamiento Huerto casero, además del suelo, los árboles en pie son la principal fuente de carbono, estos corresponden a plantaciones aprovechables, generalmente perennes, los árboles caídos muertos en baja proporción y los aportes herbáceos (fresco y seco) son mínimos y promediales.

**Cuadro 12.** Comparación de medias, carbono gestionable (t ha<sup>-1</sup>)

| Sistema de uso de la tierra | Carbono               |
|-----------------------------|-----------------------|
| Bosque Primario             | 367,07 a <sup>¶</sup> |
| Huerto Casero               | 85,23 b               |
| Bosque Secundario           | 85,01 b               |
| Café bajo sombra            | 80,16 b               |
| Silvopastura                | 33,37 b               |
| Pastura                     | 4,25 b                |

¶ Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a  $p < 0,01$ .

<sup>a</sup> Asumiendo que solo es factible administrar en el carbono epigeo: arbóreo, arbustivo y herbáceo (al menos en el corto plazo); escindiendo de él al edáfico, que en consolidado, por su baja dispersión resulta altamente distorsionante. Así consideramos importante, detallar las proporciones en las que se preserva, e inferir de ello nuestras posibilidades de intervención.

**Cuadro 13.** Aporte porcentual de carbono por componente por tratamiento

| Tratamiento   | Carbono (t ha <sup>-1</sup> ) | A. en pie | A. caídos muertos | Arbustivo-herbáceo | Hojarasca | Edáfico |
|---------------|-------------------------------|-----------|-------------------|--------------------|-----------|---------|
| B. primario   | 465,8                         | 42,1      | 35,85             | 0,16               | 0,70      | 21,21   |
| B. secundario | 181,0                         | 37,51     | 7,62              | 0,43               | 1,42      | 53,02   |
| Café + sombra | 193,7                         | 23,44     | 16,73             | 0,33               | 0,88      | 58,62   |
| Silvopastura  | 119,8                         | 25,38     | 1,17              | 0,76               | 0,54      | 72,1    |
| Pastura       | 97,3                          | 2,36      | 0,00              | 1,32               | 0,72      | 95,59   |
| Huerto casero | 195,7                         | 39,55     | 3,19              | 0,28               | 0,52      | 56,47   |

**Cuadro 14.** Comparación de medias, carbono gestionable (t ha<sup>-1</sup>)

| Sistema de uso de la tierra | Carbono |                |
|-----------------------------|---------|----------------|
| Previsto                    | 268,92  | a <sup>†</sup> |
| San Agustín                 | 192,49  | a              |
| Aguaytía                    | 165,22  | a              |

† Promedios seguidos de la misma letra, en cada columna, no son diferentes estadísticamente, por Tukey a  $p < 0,05$ .

### Carbono por localidades

No existe diferencia estadística significativa entre los volúmenes de carbono retenidos en cada localidad. La preconcepción inicial que asumía variaciones en las proporciones de acumulación consecuencia de las condiciones ambientales/piso ecológico quedan pues invalidadas.

### Agradecimientos

A mi Maestro, Dr. Krishnamurthy, por una oportunidad más.

Al Dr. J. Alegre, co-líder ICRAF-Latinoamérica, desarrollar esta investigación bajo su supervisión es una oportunidad sumamente valiosa, las facilidades otorgadas en virtud a su decisión política son plenamente reconocidas. Guardo especial reconocimiento al equipo de ICRAF-Pucallpa, en particular a su líder L. Arévalo, su gestión logística, "expertise" y calidad humana resultaron fundamentales para el logro de los productos académicos y mi feliz estadía en la Amazonía; a A. Meza por sus diligencias locales y hospitalidad; a C. Soto por la premura y eficiencia en el análisis de laboratorio; a L. Fasabi por su compromiso en la colección de información de campo.

A la Red de Formación Ambiental del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), por el respaldo financiero durante la fase académica.

Por su amparo académico y benéfica administración; al Programa de Maestría en Ciencias en Agroforestería

para el Desarrollo Sostenible y al Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, ambos entes pertenecientes a la Universidad Autónoma Chapingo.

A INIA-Pucallpa en la persona de su Director, A. Ricse, la concesión de recursos humanos y logísticos fue invaluable; a T. Amasifuen y W. Angulo y su desinteresado apoyo en la recolección de campo.

AA. Saavedra, L. Domínguez, O. Cotrina, F. Gonzáles, su contribución en campo es ampliamente apreciada.

A los agricultores locales, gentiles prestadores de los sitios de muestreo.

### Referencias

- Alegre, J., A., Ricse, C. Palm. 1998. Informe de discusiones Proyecto ASB-Carbono en sistemas de uso de la tierra; documento de circulación interna. Yurimaguas, Loreto, Perú. 2 p.
- Alegre, J., L. Arévalo y A. Ricse. En prensa. Comunicación personal. Reservas de carbono y emisión de gases con diferentes sistemas de uso de la tierra en dos sitios de la amazonía peruana. Taller Internacional de Sistemas Agroforestales CORPOICA, 31 de julio a 3 de agosto. Santa Fe de Bogota, Colombia. 15 p.
- Anderson, J.M., and J.S.I. Ingram. 1993. Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods. CAB International. Wallingford, Oxon, England.
- Baldoceda A., R. 1993. Diagramas bioclimáticos de la zona de Pucallpa y Atalaya. Universidad Nacional de Ucayali, Facultad de Ciencias Forestales,

- Departamento Académico de Conservación y Medio Ambiente. Pucallpa, Perú. 21 p.
- Barbarán G., J. 1998. Determinación de biomasa y carbono en los principales sistema de uso del suelo en la zona de Campo Verde. Tesis profesional. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa, Ucayali, Perú. 54 p.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. FAO Forestry paper, 134. Food and Agriculture Organization. Caracalla, Rome, Italy. Pp: 1-18.
- Cejas T., E. 1999. Almacenamiento de carbono en bosques tropicales secundarios de la zona de Alexander Von Humboldt-Pucallpa. Proyecto de tesis, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa, Ucayali, Perú. pp: 4-15.
- CIFOR, CATIE, BID, EMBRAPA, UCA. 1998. Protocolo de Levantamiento de vegetación en bosques secundarios. Proyecto de investigación, Manejo de bosques secundarios en América Tropical. 16 p.
- CMNUCO. 1997. Tercera sesión de la conferencia de las Partes, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático - Kyoto '97. Carpeta de Prensa. Oficina de Información sobre las Convenciones del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente para la Secretaría del Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 17 p.
- Fujisaka, S., C. Castilla, G. Escobar, V. Rodrigues, E. Veneklaas, R. Thomas, M. Fisher. 1997. Impacts of forest conversion: Estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony. Centro Internacional de Agricultura Tropical, International Centre for Research in Agroforestry, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria. 22 p.
- Gavenda, B. 2000. Soils and Carbon Sequestration. En The Overstory # 66. Carbon Sequestration: Storing Carbon in Soils and Vegetation <<http://www.agroforester.com/overstory/overstory66.html>>. 4 p.
- IPCC. 1995. Segunda evaluación, Cambio Climático 1995. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Organización Mundial de Meteorología. 71 p.
- IUCC, PNUMA. 1995. Para comprender el cambio climático: guía elemental de la Convención Marco de las Naciones Unidas. Oficina de Información sobre el Cambio Climático. Oficina Suiza del Medio Ambiente de Bosques y Paisajes. Chatelaine, Suiza. 20 p.
- Krishnamurthy, L. y M. Avila. 1999. Agroforestería Básica. Red de Formación Ambiental para América Latina y el Caribe, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. México D.F., México. pp: 29-36.
- López M., A. 1998. Aporte de los sistemas silvopastoriles al secuestro de carbono en el suelo. Tesis de Maestría. Escuela de posgrado, Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación, CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp: 3-15.
- Nair, P.K.R. 1997. Agroforestería. Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 543 p.
- ONERN. 1978. Inventario, evaluación e integración de los recursos naturales de la zona Pucallpa-Abujao. República del Perú, Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. Lima, Perú. pp: 35-55.
- Ortiz, R., O. Ramírez, B. Finegan. 1998. CO<sub>2</sub> Mitigation service of Costa Rican secondary forests as economic alternative for joint implementation initiatives. En Ecology and management of tropical secondary forest science, people and policy. CATIE, CIFOR. Turrialba, Costa Rica. pp: 213-227.
- Palm C.A., K. Hariah y M. van Noordwijk. Junio 1999. Muestreo revisado de carbono para ASB. Mimeografiado. Documento de trabajo. 7 p.
- Palm, C.A., L. Arévalo. Sept 9. 2000. Comunicación electrónica. Carbon Stock Pucallpa. 1 p.
- Palm, C.A., M. van Noordwijk, J. Alegre, L. Arévalo. Oct. 28. 2000. Comunicación electrónica. Carbon Calculations. 1 p.
- Palm, C.A., P.L. Woomeer, J. Alegre, L. Arévalo, C. Castilla, D.G. Cordeiro, B. Feigl, K. Hairiah, J. Kotto-Same, A. Mendes, A. Moukam, D. Murdiyarso, R. Njomganag, W.J. Parton, A. Ricse, V. Rodrigues, S.M. Sitompul, and M. van Noordwijk. 1999. Carbon Sequestration and Trace Emissions in Slash and Burn and alternative Land Uses in the Humid Tropics. ASB Climate Change working group report, Final report, Phase 2. 27 p.
- Parlamento Latinoamericano, Ciudadanía Ambiental Global, ALDA. 1998. La lucha contra el Cambio Climático: el compromiso del Parlamento Latinoamericano; Primer taller del Parlamento Latinoamericano sobre el Cambio Climático. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Buenos Aires, Argentina. 174 p.
- Schroeder, P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. Agroforestry Systems 27. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. pp: 89-97.
- Segura M., M. 1997. Almacenamiento y fijación de carbono en *Quercus costaricensis*, en un bosque de

- altura en la cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis profesional. Universidad Nacional, Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Escuela de Ciencias Ambientales. Heredia, Costa Rica. 125 p.
- Segura M., M. 1999. Valoración del servicio ambiental de fijación y almacenamiento de carbono en bosques privados del Area de conservación Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. Tesis de Maestría. Escuela de Posgrado, Programa de Enseñanza para el Desarrollo y la Conservación, CATIE. Turrialba, Costa Rica. pp: 1-23.
- Subak, S. 2 000. Agricultural Soil Carbon Accumulation in North America, Considerations for Climate Policy. Natural Resources Defense Council. USA. 19 p.
- UNEP, EU, SIDS. 1999. Caribbean Environment Outlook. United Nations Environment Programme, European Community, Small Island Developing States. Anagram Editorial Service. Guilford, United Kingdom. 74 p.
- UNEP, GEMS. 1992. Los gases que producen el efecto de invernadero (cambio climático global). Sánchez-Vélez A. y Gerón D., X. Traductores. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 41 p.
- UNEP. 1996. Final Report of the Citizen Forum on Regional Environmental Management. United Nations Environment Programme, Regional Office for Latin America and the Caribbean. Buenos Aires, Argentina. pp 15-33.
- USDA-NAC. Marzo 2000. Working Trees for Carbon Cycle Balance. Agroforestry: Using trees and shrubs to produce social, economic, and conservation benefits. United States Department of Agriculture, National Agroforestry Center. UNL, Lincoln, USA. 3 p.
- USDA-NRCS. 2 000. Growing Carbon, A New Crop That Helps Agricultural Producers and the Climate Too. United States Department of Agriculture, National Agroforestry Center, Environmental Defense, Soil and Water Conservation. USA. 7 p.
- Videoriente. 1 996. Gran Enciclopedia de la Región Ucayali. Videoriente Editores. Lima, Perú. pp: 17-24.
- Woomer, P.L. and C.A. Palm. 1 993. Shifting Cultivation Effects on Tropical Soil Organic Matter. Experimental Protocol prepared for the Global Initiative for Alternatives to Slash and Burn Agriculture. Tropical Soil Biology and Fertility Programme. Nairobi, Kenya. Mimeografiado 35 p.
- WRI. Marzo 2 000. Climate Change; Forest and land-use change carbon sequestration projects. World Resources Institute. Washington DC., USA. 5 p.
- WRM. Octubre 1998. Boletín electrónico # 16. World Rainforest Movement. <<http://www.wrm.org.uy>>



## Cambio de Uso de Suelo y Flujos de Carbono en los Altos de Chiapas, México

Bernardus H.J. de Jong

*El Colegio de la Frontera Sur, México*  
*e-mail [bjong@slc.ecosur.mx](mailto:bjong@slc.ecosur.mx)*

### Resumen

Con el fin de estimar los flujos de carbono entre los ecosistemas terrestres y la atmósfera desde los 1970s hasta los 1990s, se aplicaron datos de densidades de carbono por unidad de superficie con base en datos colectados en el campo y mapas de uso de suelo y cobertura vegetal. El flujo neto de carbono fue calculado, restando los reservorios de carbono de las épocas que abarcan el estudio. Durante este período los bosques cerrados disminuyeron significativamente, mientras que los bosques degradados y/o fragmentados se expandieron sustancialmente, mientras las áreas de cultivo y pastizales se expandieron moderadamente. El total de carbono presente en las clases de uso de suelo varió entre 504 MgC ha<sup>-1</sup> en bosques de encino y nebliselva a 147 MgC ha<sup>-1</sup> en los pastizales. Las diferencias en densidades de carbono entre las clases de hábitat se debieron a cambios en biomasa aérea. La materia orgánica en el suelo no mostró diferencias significativas. Se estimó que aproximadamente 34% del reservorio de vegetación presente en 1975 desapareció en 1996. La región Altos de Chiapas contribuyó en 3% a las emisiones nacionales de carbono por cambio de uso de suelo, mientras que el área representa alrededor del 0.3% de la superficie de México.

---

### Introducción

Ecosistemas forestales contienen grandes cantidades de carbono (C) almacenado en biomasa viva y muerta y en el suelo (Post et al, 1982). Sin embargo, especialmente en las regiones tropicales hay un proceso acelerado de conversión de ecosistemas forestales con alta cantidad de biomasa a ecosistemas con bajos niveles, como vegetación secundaria, áreas cultivadas y pastizales (FAO, 1993). Las estimaciones del total de CO<sub>2</sub> emitido a partir de estas reducciones en biomasa y procesos de deforestación varían entre 8 y 44% del total de emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> (Cook et al, 1990; Schimel, 1995).

Los Altos de Chiapas (Los Altos), México, despliega un patrón de uso de suelo similar a muchos paisajes montañosos de Latinoamérica. Estas áreas son habitadas en general con agricultores de origen indígena, pero al mismo tiempo están sujetos a un proceso rápido de deforestación y degradación de suelo debido a una creciente población, la cual no tiene alternativas económicas para incrementar la producción en forma sustentable (Bremer et al, 1984).

La tasa de deforestación en Los Altos se estima entre 3.2% (1974-1984) y 3.6% (1984-1990) para bosques cerrados y entre 1.6% (1974-1984) y 2.1% (1984-1990) para bosques cerrados y abiertos combinados (Ochoa-Gaona y González-Espinosa, 2000). Las causas principales

de la conversión forestal son los aprovechamientos forestales y incendios, y en menor grado la conversión a pastizales (Maser et al, 1992; De Jong y Montoya-Gómez, 1994). Las fuerzas atrás de estos procesos han sido los incentivos gubernamentales para el desarrollo agropecuario, el crecimiento poblacional, un cambio en los sistemas de producción de subsistencia hacia sistemas comerciales, desarrollo de infraestructura y la inseguridad de tenencia de tierra y árbol (De Jong y Montoya-Gómez, 1994).

Aún no existen datos precisos acerca la reducción de biomasa asociado a los procesos de deforestación y degradación que a la vez no permite desarrollar modelos de flujos de C para los patrones regionales de uso de suelo. En México se considera prioritario tener estos datos acerca de flujos de C relacionados a la dinámica de uso de suelo, ya con ellos se puede determinar el papel que juega esta dinámica de C en el balance general de emisiones de gases de invernadero en el ámbito nacional. En este estudio se presenta los resultados de un estudio de caso en el cual se estiman las emisiones relacionadas a la dinámica de uso de suelo multiplicando las densidades de C por tipo de cobertura vegetal medidas en el campo por las estadísticas de uso de suelo / cobertura vegetal de los años 1970s y 1990s. La diferencia

en biomasa total en el área entre las dos épocas nos da una estimación del nivel de flujos de C hacia la atmósfera a causa de los cambios de uso de suelo durante este periodo.

## Métodos

### Área de estudio

Los Altos de Chiapas (Figura 1) se localizan en la parte central del estado de Chiapas y está formado por 18 municipios completos o parciales. El área seleccionada varía en altitud entre 1500 y 2900 m s.n.m. y contiene varias formaciones forestales y se caracteriza por una alta biodiversidad como resultado de una gran variedad geológica, edafológica, climatológica y antropológica (Breedlove 1981). Los ecosistemas naturales más importantes incluyen bosque de pino, pino-encino, encino y nebliselva (Breedlove 1981; González-Espinosa et al, 1995b). Estos bosques se consideran representativos de los bosques del sur de México, Gua-

temala, Honduras y norte de Nicaragua. El clima regional es subtropical a templado con lluvias de verano y sequías en el invierno y con una precipitación anual entre 1100-2000 mm.

Cambios de uso de suelo recientes han sido extensivos e intensivos. Mientras hace unas décadas se observaron todavía grandes extensiones de bosques maduros, actualmente la cobertura vegetal representa un paisaje altamente perturbado con parcelas de 0.5 a 2 ha de áreas cultivadas, vegetación secundaria, pastizales temporales o permanentes y bosques degradados y abiertos (Parra-Vázquez et al, 1989; González-Espinosa et al, 1991). La estructura y composición de los fragmentos de bosques remanentes han sido alteradas por un corte selectivo de árboles de pino para madera y de encino para leña y carbón vegetal (De Jong y Montoya-Gómez 1994; González-Espinosa et al., 1995a, b), y pastoreo extensivo con borregos (De Jong y Montoya-Gómez 1994).

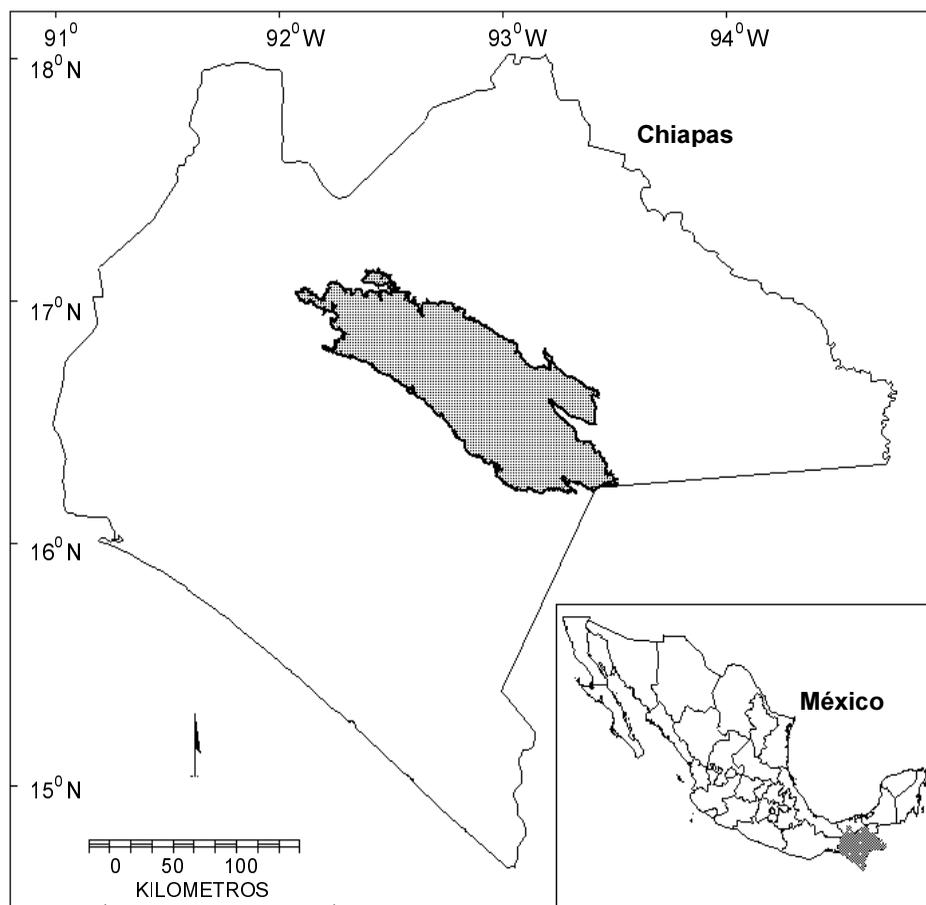


Figura 1. Área de estudio.

### Mapas de vegetación

Para calcular las coberturas de las formaciones forestales y otras coberturas vegetales en los dos periodos evaluados se utilizaron dos series de mapas que cubren el periodo entre los 1970s y 1990s.

La serie de 1970s fue elaborada a partir de interpretaciones de fotos aéreas tomadas entre 1972 y 1982 con una escala de 1:50 000 a 1:80 000. Los mapas se digitalizaron manualmente en Arc/Info. La serie de 1990s fue elaborada a partir de interpretaciones de imágenes de satélite Landsat TM. Para demarcar la zona de estudio se utilizó el límite inferior de 1,500 m s.n.m. Las coberturas vegetales en cada mapa fueron calculadas en ambiente SIG. Se utilizó la siguiente clasificación compuesta para los dos mapas como base de comparación:

**Bosques de encino y nebliselva.** Son bosque dominados por encinos o latifoliadas, cubriendo más de 80% del área basal.

**Bosque de pino-encino.** Bosques en los cuales los pinos y encinos en conjunto constituyen más de 80% del área basal total.

**Bosque de pino.** Bosques dominados por pinos ocupando más de 80% del área basal.

El dosel de las clases anteriores cubre más de 40% de la superficie

**Bosques degradados y fragmentados.** Incluyen bosques abiertos (10 - 40% cobertura del dosel), vegetación arbustiva, bosque secundario, plantaciones forestales y agricultura migratoria (SARH, 1994; INEGI, 1984, 1987, 1988).

**Áreas cultivadas.** Incluyen agricultura temporal y permanente.

**Pastizales.** Incluyen pastizales inducidos e introducidos.

**Cuerpos de agua.** Incluyen lagos y ríos. En el estudio se asumió que esta clase no contiene biomasa y por ende se excluyó del análisis de flujos de C.

### Densidades de Carbono

Se inventariaron 39 parcelas de 60 x 90 m cada una. Los reservorios más importantes presentes en cada parcela se midieron con métodos estándares. El número de parcelas para cada clase de cobertura o uso de suelo y su localización se seleccionaron con base en su representatividad general en cuanto a distribución de las clases en el área de estudio y variabilidad esperada en densidades de C. Por ende, el número de parcelas por clases varía entre tres parcelas en las clases de uso de suelo con baja densidad de biomasa (pastizales y áreas cultivadas) a 10-11 para los bosques de pino-encino y bosques degradados y fragmentados. Se subdividió cada parcela en seis sub-parcelas de 30 x 30 m, para estimar la variabilidad de biomasa dentro cada parcela. Se calculó el reservorio de C presente por unidad de área (t C / ha) para todos los reservorios medidos. De cada árbol con DAP > 5 cm se midió el diámetro y se determinó la especie. Se utilizaron ecuaciones alométricos locales de biomasa total en relación con diámetro para calcular la cantidad de carbono en cada árbol. Toda la regeneración natural, plantas herbáceas y hojarasca fueron colectadas en cuatro cuadros de 1 m<sup>2</sup> y se determinó el peso seco en el laboratorio. El contenido de carbono de cada muestra se determinó para cada parcela. Se colectaron muestras de suelo en cuatro cuadros de 50 x 50 cm hasta 1 m de 0 - 10 cm, 11 - 20 cm, 21 - 30 cm, 31 - 50 cm, 51 - 100 cm. De cada estrato en cada cuadro se tomaron muestras para determinar el contenido de carbono, aplicando el método de Walkley y Black (1934). Se utilizaron el método de línea interceptada para estimar el volumen de ramas y fustes caídos sobre el suelo, con correcciones para ángulos verticales (Brown y Roussopoulos, 1974). La densidad de madera y contenido de carbono de las ramas y fustes caídos se determinaron a partir de muestras colectadas. Se colectaron raíces finas (<0.5 cm) en cuatro cuadros de 0.25 m<sup>2</sup> hasta 1 m de profundidad y se

**Cuadro 1.** Cambios en la cobertura vegetal y uso de suelo en Los Altos de Chiapas entre 1970s y 1990s..

| Clase de vegetación y uso de suelo          | Area (ha)      | Area (ha)      | Cambio |
|---|----------------|----------------|--------|
|   | 1975           | 1991           |        |
| Bosque de Encino                            | 65,300         | 32,700         | -50%   |
| Bosque de pino-encino                       | 119,150        | 58,250         | -51%   |
| Bosque de pino                              | 72,100         | 35,000         | -51%   |
| Total de bosques cerrados                   | 256,550        | 125,950        | -51%   |
| Bosque degradado y abierto                  | 203,200        | 316,400        | 56%    |
| Área en desarrollo (Agricultura y pastizal) | 159,800        | 177,250        | 10%    |
| Cuerpo de agua                              | 600            | 550            | -5%    |
| <b>Total</b>                                | <b>620,150</b> | <b>620,150</b> |        |

**Cuadro 2.** Densidades de carbono en t C/ha para las clases de uso de suelo en Loa Altos de Chiapas, México.

| Clases                                 | n  |          | Densidad de C     |                  |                  |                  |
|--|----|----------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
|  |    |          | Arriba del suelo  | Raíces           | MO               | Total            |
| <i>Bosque de encino</i>                | 7  | Promedio | 189 <sup>A</sup>  | 36 <sup>A</sup>  | 243 <sup>A</sup> | 468 <sup>A</sup> |
|  |    | Rango    | 108-302           | 21-55            | 102-461          | 232-818          |
|  |    | CV (%)   | 14                | 16               | 16               | 14               |
| <i>Bosque de pino-encino</i>           | 11 | Promedio | 135 <sup>A</sup>  | 31 <sup>A</sup>  | 174 <sup>A</sup> | 341              |
|  |    | Rango    | 78-169            | 20-41            | 85-412           | 229-596          |
|  |    | CV (%)   | 21                | 24               | 53               | 32               |
| <i>Bosque de pino</i>                  | 5  | Promedio | 120 <sup>AB</sup> | 26 <sup>AB</sup> | 173 <sup>A</sup> | 318 <sup>A</sup> |
|  |    | Rango    | 80-244            | 17-46            | 130-276          | 243-566          |
|  |    | CV (%)   | 58                | 46               | 34               | 44               |
| <i>Bosques degradado y fragmentado</i> | 10 | Promedio | 29 <sup>B</sup>   | 9 <sup>BC</sup>  | 184 <sup>A</sup> | 222 <sup>A</sup> |
|  |    | Rango    | 10-106            | 1-27             | 145-316          | 168-402          |
|  |    | CV (%)   | 32                | 36               | 46               | 44               |
| <i>Agricultura</i>                     | 3  | Promedio | 6 <sup>B</sup>    | 1 <sup>C</sup>   | 153 <sup>A</sup> | 160 <sup>B</sup> |
|  |    | Rango    | 4-8               | 0-1              | 135-178          | 144-184          |
|  |    | CV (%)   | 34                | 53               | 14               | 14               |
| <i>Pastizales</i>                      | 3  | Promedio | 18 <sup>B</sup>   | 4 <sup>BC</sup>  | 125 <sup>A</sup> | 147 <sup>B</sup> |
|  |    | Rango    | 4-37              | 1-9              | 88-184           | 118-188          |
|  |    | CV (%)   | 94                | 114              | 41               | 25               |

**Cuadro 3.** Flujos de carbono (en Mt C) como resultado de los cambios en el uso de suelo entre 1975 y 1991.

| Land Use/Land Cover Class                        | Flujo de C entre 1975 y 1991 (MtC) |                 |                 |
|--|------------------------------------|-----------------|-----------------|
|  | Vegetación                         | Suelo           | Total           |
| Bosque de encino                                 | 7.3                                | 7.9             | 15.3            |
| Bosque de pino-encino                            | 10.1                               | 10.6            | 20.8            |
| Bosque de pino                                   | 5.4                                | 6.4             | 11.8            |
| Bosque degradado y fragmentado                   | -4.3                               | -20.9           | -25.1           |
| Agricultura                                      | -0.1                               | -1.59           | -1.66           |
| Pastizal   | -0.2                               | -0.9            | -1.0            |
| <b>Flujo total y en % del reservorio de 1975</b> | <b>18.4 (34%)</b>                  | <b>1.6 (1%)</b> | <b>20 (12%)</b> |

determinó el peso seco y contenido de carbono de cada muestra (Saldarriaga et al, 1988). La densidad de raíces grandes se estimó con fórmulas alométricas publicadas entre biomasa de raíces y biomasa arriba del suelo (Pinard y Putz 1997; Cairns et al, 1997).

Se utilizaron un ANOVA (SAS Institute Inc. 1988) para determinar si haya diferencias entre las clases de uso de suelo para la biomasa total, biomasa arriba del suelo, raíces y materia orgánica (MO) del suelo. En los casos que se detectaron diferencias significativas, se utilizó el procedimiento de comparación múltiple de Scheffe para identificar las diferencias entre pares de las clases, aplicando el nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$ .

Para calcular los reservorios totales y flujos a consecuencia de cambio en el uso de suelo entre los años 1970s y 1990s, se separaron los reservorios de la vegetación (la suma de la biomasa viva y muerta y raíces) y la materia orgánica del suelo. Se calculó los intervalos de confianza de 95% para examinar los posibles errores en las estimaciones asociados a las variaciones en densidades de carbono en las clases de uso de suelo de los reservorios vegetación y MO.

## Resultados

### *Cambios de uso de suelo*

En el período entre los dos inventarios, el área con bosques cerrados disminuyó 50%, mientras el área con bosques degradados y abiertos incrementó 56% y las áreas en desarrollo (agricultura y pastizales) con 10% (Cuadro 1). La tendencia del cambio que se observó era entonces de ecosistemas forestales cerrados hacia sistemas forestales perturbados y fragmentados y a menor grado hacia áreas de uso agrícola intensivo.

### *Densidades y flujos de carbono*

La densidad total de carbono en las diferentes clases de uso de suelo varía entre 147 y 504 tC/ha, aunque sólo las áreas agrícolas y pastizales tenían diferencias significativas con las clases con cobertura forestal (Cuadro.2), principalmente por tener poca biomasa arriba del suelo y raíces. Las densidades de MO varían entre 279 tC/ha en bosque de encino 129 y 154 tC/ha en pastizal y agricultura. El coeficiente de varianza promedio era de 29%, con valores altos en biomasa arriba de suelo (94%) y raíces (114%) en pastizal, biomasa arriba del suelo en bosque de pino (58%), y MO en bosque de pino-encino (53%) (Cuadro2). Los valores bajos se encontraron en biomasa total de bosque de encino y agricultura (14%).

En total se emitió 20 Mt C entre 1970s y 1990s en el área de estudio ó 12% del total de C en la región en

1970s (Cuadro 3). Aproximadamente 34% del reservorio de biomasa viva de 1970s desapareció, mientras la cantidad de C en MO quedó mas o menos estable. El flujo de C a la atmósfera se atribuyó a la pérdida de biomasa viva de los tres tipos de bosques cerrados.

## Discusión

Los cambios en la cobertura forestal fueron principalmente hacia bosques abiertos y degradados, debido a la extracción selectiva de árboles para madera (pinos), leña y carbón (encinos). Los bosques remanentes después de la extracción de madera se usan frecuentemente para el ganado bovino y ovino o para cultivar. El paisaje resultante incluye parches pequeños de bosques maduros ligeramente perturbados, rodeados por un matrice de áreas extensas de vegetación secundaria compuesta por arbustos y árboles pequeños, bosques severamente degradados, pastizales inducidos y parcelas cultivadas (González-Espinosa et al, 1991; De Jong y Montoya-Gómez, 1994).

Dado que cambios en el uso de suelo no sólo significan cambios en la cobertura vegetal, pero también afectan las densidades de C en cada clase de uso de suelo, esperamos que la densidad de C en cada clase era mas alta en los 1970s en comparación con los 1990s. Sólo se midió las densidades de C en los 1990s en este estudio, por lo que se sospecha que los flujos de C hacia la atmósfera eran mayores a los flujos estimados, ya que se utilizaron las mismas densidades de C para los 1970s. No se podía verificar esta hipótesis por falta de estudios previos. Sin embargo, estos procesos de degradación de biomasa han sido reportados en otros bosques tropicales (Flint y Richards, 1991; Brown y Lugo, 1992).

Los últimos inventarios Mexicanos de emisiones de gases de invernadero reportan emisiones anuales de 37.1 Mt C a consecuencia de cambios de uso de suelo a escala nacional. (Maser et al, 1995). El área de estudio que representa 0.3% de la superficie nacional, contribuyó en 3.4% a la emisión nacional total [(20 Mt/16 yr)/37.1 Mt, Cuadro 3)], lo que indica que ha experimentado un proceso acelerado de cambios en el uso de suelo en las últimas dos décadas en comparación con el resto de México.

## Literatura citada

Breedlove, D.E. 1981. Flora of Chiapas, Part I: Introduction to the Flora of Chiapas. The California Academy of Sciences, San Francisco, CA.

- Bremer, J., Babb, T., Dickinson, J., Gore, P., Hyman, E., y Andre, M. 1984. Fragile lands: a theme paper on problems, issues, and approaches for development of humid tropical lowlands and steep slopes in the Latin American Region. Development Alternatives, Washington D.C.
- Brown, J.K., y Roussopoulos, P.J. 1974. Eliminating biases in the planar intersect method for estimating volumes of small fuels. *Forest Science* 20: 350-356.
- Brown, S. y Lugo, A.E. 1992. Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17: 8-18.
- Caims, M.A., Brown, S., Helmer, E. H., y Baumgardner, G.A. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia* 111: 1-11.
- Cook, A.G., Janetos, A.C., y Hinds, W.T. 1990. Global effects of tropical deforestation: towards an integrated perspective. *Environmental Conservation* 17: 201-212.
- De Jong, B.H.J. y Montoya-Gómez, G. 1994. Sustainable management of forest resources: a proposal for the highlands of Chiapas, Mexico. Pages 7-17 in Proceedings of the 1994 symposium on systems analysis in forest resources: management systems for a global economy with global resource concerns, Sept 6-9, 1994. Pacific Grove, CA.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1993. Forest resources assessment 1990 tropical countries. FAO Forestry Paper 112. FAO, Rome. 59 pp.
- Flint, E.P. y Richards, J.F. 1991. Historical analysis of changes in land use and carbon stocks of vegetation in South and Southeast Asia. *Canadian Journal of Forest Research* 21: 91-110.
- González-Espinosa, M., Quintana-Ascencio, P.F., Ramírez-Marcial, N., y Gaytán-Guzmán, P. 1991. Secondary succession in disturbed Pinus-Quercus forests in the highlands of Chiapas, Mexico. *Journal of Vegetation Science* 2: 351-360.
- González-Espinosa, M., Ochoa-Gaona, S., Ramírez-Marcial, N., y Quintana-Ascencio, P.F. 1995a. Current land-use trends and conservation of old-growth forest habitats in the highlands of Chiapas, Mexico. Pages 190-198 in M.H. Wilson and S.A. Sader (eds.) Conservation of Neotropical Migratory Birds in Mexico. Maine Agricultural and Forest Experiment Station, Miscellaneous Publication 727, Orono, ME.
- González-Espinosa M., Ramírez-Marcial, N., Quintana-Ascencio, P.F., y Martínez-Ic6, M. 1995b. La utilización de los encinos y la conservación de la biodiversidad en Los Altos de Chiapas. In: Memorias del tercer seminario nacional sobre utilización de encinos, 4-6 de Noviembre de 1992. Reporte Científico UANL, Número Especial 15. Linares, Nuevo Leon, Mexico. p. 183-197
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía y Informática). 1984. Carta Uso del Suelo y Vegetación 1:250 000. Tuxtla Gutierrez E15-11. INEGI, Mexico, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía y Informática). 1987. Carta Uso del Suelo y Vegetación 1:250 000. Villahermosa E15-8. INEGI, Mexico, D.F.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía y Informática). 1988. Carta Uso del Suelo y Vegetación 1:250 000. Las Margaritas E15-12. INEGI, Mexico, D.F.
- Masera, O., Ordóñez, M. de Jesús, y Dirzo, R. 1992. Carbon emissions from deforestation in Mexico: Current situation and long-term scenarios. Pages 1-49 in W. Makundi and J. Sathaye (eds.) Carbon emission and sequestration in forests: Case studies from seven developing countries, Summary. Report No. LBL-32665. Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, CA.
- Masera, O., Hernández, T., Ordóñez, A., y Guzmán, A. 1995. Chapter 5. Land use change and forestry. In: C. Gay, L.G. Ruíz-Suarez, M. Imaz, and J. Martínez (eds.) Preliminary national inventory of greenhouse gas: Mexico. September, 1995. Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. México City. Updated March, 1997 by Table: Summary Report for National Greenhouse Gas Inventories, J. Martinez. p. 56-100
- Ochoa-Gaona, S. y González-Espinosa, M.. 2000. Land-use patterns and deforestation in the Highlands of Chiapas, Mexico. *Applied Geography* 20: 17-42.
- Parra-Vázquez, M.R., Alemán-Santillán, T., Nahed-Toral, J., Mera-Ovando, L.M., López-Mejía, M., y López-Meza, A. 1989. El subdesarrollo agrícola en los altos de Chiapas. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México. 405 pp.
- Pinard, M.A., y Putz, F.E.. 1997. Monitoring carbon sequestration benefits associated with a reduced-impact logging project in Malaysia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 2: 203-215.
- Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.J., y Stangenberg, A.G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298: 156-159.
- Saldarriaga, J.G., West, D.C., Tharp, M.L., y Uhl, C. 1988. Long-term chronosequence of forest succession in the upper Rio Negro of Colombia and Venezuela. *Journal of Ecology* 76: 938-958.
- SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos). 1994. Inventario nacional forestal periódico. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México, D.F. 81 pp.
- SAS Institute Inc. 1988. SAS/STAT User's Guide, Release 6.03 Edition. SAS Institute, Cary, NC. 1028 pp.
- Schimel, D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* 1: 77-91.
- Walkley, A. y Black, A. 1934. An examination of the Degjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science* 37: 29-38.

## Los Stocks de Carbono en Diferentes Compartimientos de la Parte Aérea y Subterránea en Sistemas Forestales y Agrícolas de Ladera en México.

J. Etchevers<sup>1</sup>, M. Acosta<sup>2</sup>, C. Monreal<sup>3</sup>, K. Quednow<sup>4</sup> y L. Jiménez<sup>1</sup>.

*Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México*  
*e – mail: jetchev@colpos.mx*

### Resumen

Uno de los servicios ambientales resultantes del manejo sustentable de las tierras de laderas, y que se estima tiene potencial económico, es el secuestro de C. México cuenta con extensas superficies de terrenos forestales en laderas que sobrepasan 50% de pendiente, en parte convertidas en terrenos de cultivo por presiones de población y problemas sociales, y que hoy presentan un mosaico de sistemas de vegetación, en los cuales se supone existe potencial para capturar C. Sin embargo, una dificultad es la manera de estimar con confiabilidad el tamaño de los depósitos de C presentes en diferentes tipos de uso del suelo, así como la proyección de su cambio en el futuro.

Los modelos de simulación, los cuales son generalmente aplicables a condiciones similares a las que se generaron, es una de las alternativas metodológicas disponibles para abordar este problema, pero se carece de información que permita usarlos en las condiciones indicadas. Otras posibilidades se basan en estimaciones del cambio de la vegetación mediante imágenes de satélite, pero éstas no consideran los depósitos que hay en el suelo y, que con frecuencia, rebasan en 2 o 3 veces a los depósitos de la biomasa aérea.

En las regiones (Mazateca, Cuicateca y Mixe) de la Sierra norte del estado de Oaxaca, México, predomina un tipo de vegetación típica de bosque mesófilo de montaña alterado, que se caracteriza por estar constituido por una gran variedad de especies arbóreas herbáceas y arbustivas, junto con vegetación secundaria correspondiente al sistema de explotación roza-tumba-quema (RTQ), localmente denominados *acahuales*, y áreas de cultivo. En esas regiones se llevó a cabo la cuantificación directa de los almacenes de C en diferentes sistemas de manejo, los que fueron separados en almacenes correspondientes a la parte aérea y subterránea. El C asociado a la biomasa aérea se dividió en C en la hojarasca, en hierbas-arbustos y en árboles, y el de los almacenes subterráneos se particionó en C en las raíces y el asociado a la masa mineral del suelo.

La medición que aquí se describe tuvo por objeto medir el tamaño de los depósitos de C en cada sistema, en un tiempo cero (línea base), para posteriormente realizar evaluaciones que permitan establecer el potencial para capturar C de cada sistema y ajustar los modelos existentes a condiciones de agricultura y forestería de ladera. Los resultados muestran que la cantidad de C acumulada en el suelo de ladera (1 metro de profundidad) puede llegar a ser hasta 50 veces superior al C capturado por la biomasa aérea en un año, particularmente en los sistemas agrícolas, en tanto que en algunos bosques las cantidades de C presentes en el suelo y la parte aérea pueden ser casi iguales. Dos de las regiones estudiadas presentan cantidades de C similares debido a condiciones climáticas parecidas. En la Región Cuicateca los sistemas con más C fueron la pradera (PR) y el bosque de encino (BE) con 95 y 92 (Mg.ha<sup>-1</sup>) respectivamente; aunque la PR tenía 87 Mg.ha<sup>-1</sup> de C en el suelo y el BE sólo 40 Mg.ha<sup>-1</sup>.

El sistema con mayor cantidad de C almacenado fue un de bosque de liquidámbar (BL) de aproximadamente 40 años en la región Mazateca (244 Mg.ha<sup>-1</sup> C), con casi igual proporción de C en la parte aérea y subterránea. En la región Mixe, el sistema que más C tenía fue la labranza tradicional (LT) con 305 Mg.ha<sup>-1</sup> C, la mayoría de éste en el suelo. De los sistemas naturales, el que mayor cantidad de C tenía fue un *acahual* de 7 años de edad, con 199 Mg.ha<sup>-1</sup>, de los cuales 169 Mg.ha<sup>-1</sup> estaban en el suelo. En este tipo de ecosistemas, el mayor almacén de C es el suelo, y contrariamente a lo que podría pensarse, los sistemas tradicionales de explotación contribuyen a que se establezcan grandes almacenes de C en el suelo, por lo que es de gran importancia realizar actividades encaminadas a la protección de este recurso natural en esas laderas.

---

1 Profesor Investigador del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, México.

2 Investigador Titular del INIFAP. Campo Experimental Valle de México.

3 Special Advisor – Environment/Energy Agriculture and Agri-Food Canada.

4 Estudiante de la BTU Alemania.

## Carbon stocks in different compartments of the aboveground and underground of forestry and agricultural systems on slopes in Mexico

### Summary

One of the environmental services that results from sustainable management of hillside lands, and that is considered to have economic potential, is the carbon sequestration. Mexico has extended areas of forests on land with slopes steeper than 50%. Partially converted into agricultural lands because of population pressure and social problems, today they create a patchwork of systems of vegetation, which are believed to have a potential for the capture of C. However, it is difficult to find a way to reliably estimate the size of the C deposits present in soils with different uses or to project how they will change in the future.

Simulation models, which are generally applicable to conditions similar to those in which they are generated, are one of the alternative methods available for approaching this problem, but there is little information that would permit their use in the conditions described here. Other possibilities are based on estimations of changes in the vegetation by means of satellite images, but these do not consider deposits that exist in the soil, which frequently exceed 2 or 3 times the deposits of C in the aerial biomass.

In the regions (Mazateca, Cuicateca, and Mixe) of the northern sierra of the state of Oaxaca, Mexico, the vegetation that dominates is typical of altered mountain cloud forests, which is characterized by a wide variety of tree, herbaceous, and bush species. This is found together with secondary vegetation characteristic of the agricultural system of slash-and-burn, locally called *acahuales*, and cropping areas. In these regions direct quantification of C stocks in different management systems was carried out. These were separated into aerial storage and underground storage. C associated with aerial biomass was divided into litter, herbaceous and bush, and tree carbon. Underground storage was divided into C in the roots and C associated with the mineral mass of the soil.

The measurements described here were taken to find the size of C deposits in each system, at base line, to assess each system in such a way as to determine its potential for capturing C and to adjust the existing models to conditions of agriculture and forestry on hillsides. The results show that the quantity of C accumulated in hillside soil (1 m deep) in one year can be up to 50 times greater than the C captured by the aerial biomass, particularly in the agricultural systems, while in some forests the quantities of C present in the soil and aerial part can be almost equal. In two of the regions, similar quantities of C were found since climatic conditions were alike. In the Cuicateca region, the systems with more C were pasture lands (PR) and oak forest (BE) with 95 and 92 ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), respectively, although PR had 87  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  C in the soil and BE only 40  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

The system with the largest amount of stored C was a sweetgum forest approximately 40 years old in the Mazateca region (244  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  C), with almost the same proportion of C in the aerial part as in the underground part. In the Mixe region, the system with the most C was traditional tillage with 305  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , most of which was in the soil. Of the natural systems, the one with the most C was a seven-year-old area of *acahual*, with 199  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  C, of which 169  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$  was in the soil. In this type of ecosystem, most of the C stock is in the soil and, contrary to what might be believed, traditional farming systems contribute to the formation of large stocks of C in the soil; therefore, it is very important to take action toward protecting this natural resource from erosion on the hillsides.

---

### Introducción

El actual cambio climático global se atribuye a la concentración en la atmósfera de los llamados gases invernadero (GI) por arriba de los niveles históricos. Se estima que el incremento de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$  en la atmósfera producirá un aumento en la temperatura media global entre 3 y 5 ° C, y afectará las condiciones climáticas actuales (IPCC, 2001).

En nivel global, las actividades de la agricultura utilizan un 35 % de todas las tierras existentes en el planeta. Las actividades agrícolas, incluyendo el cambio de uso, constituyen una fuente importante de GI, siendo responsable del 25 % del  $\text{CO}_2$ , 50 % del  $\text{CH}_4$  y 70 % del  $\text{N}_2\text{O}$  emitido por todas las actividades humanas (Agriculture and Agri-Food Canada, 1998). Sin embargo, la

adopción de nuevas prácticas de manejo por parte de los productores podría contribuir a menores emisiones de GI en las tierras agrícolas del mundo. De hecho, ya se ha demostrado que éstas pueden ayudar a restaurar la calidad del aire, al transformarse de emisoras netas de GI en sumideros ("sinks") netos a través de la captura del C y N atmosférico y su acumulación en la materia orgánica del suelo (MO) (Agriculture and Agri-Food Canada, 1998). Vale acotar que el C constituye cerca del 58 % de la MO, y que este C mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y favorece el aumento de los rendimientos de los cultivos (Herrick y Wander, 1998).

Actualmente no existe una metodología estándar para medir la captura del C en sistemas de producción agrícola en ladera como los existentes en el estado de Oaxaca, México. Estudios publicados en otras áreas y zonas climáticas del mundo (Lal, 1998) reportan que es posible capturar el C atmosférico en los suelos a través de prácticas de manejo que aumenten la biomasa de las plantas, reduzcan la erosión de suelo y la oxidación microbiana de la MO del suelo. Dentro de estas prácticas de manejo pueden incluirse la labranza de conservación, rotación de cultivos que incluyan leguminosas, cultivos de cobertera, barreras de plantas, aforestación, pastizales, la adición de compostas y abonos de origen animal y verde (Lal, 1998).

México cuenta con un alto potencial para incrementar el secuestro de C en áreas forestales, que se han convertido en terrenos de cultivo y muchas son laderas que sobrepasan al 50% de pendiente. Una dificultad, sin embargo, es la estimación confiable de los depósitos de C en diferentes tipos de uso del suelo. Algunas de las metodologías que se han desarrollado recurren a modelos de simulación, los que no han sido validados para estas condiciones, otras metodologías se basan en estimaciones de la vegetación mediante imágenes de satélite, pero esta última no permite hacer estimaciones de los depósitos de C que hay en el suelo, y que a veces superan en 2 o 3 veces a los depósitos de la biomasa aérea.

Tanto por el problema de cambio climático, como por la práctica de la agricultura en laderas por las comunidades rurales en México, en 1999 se inició el Proyecto Manejo Sustentable de Laderas (PMSL) en tres regiones marginales del estado de Oaxaca (Mazateca, Cuicateca y Mixe). Este proyecto contó con el auspicio de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), el Gobierno del Estado de Oaxaca y el Global Environment Facility (GEF) en conjunto con el Banco Mundial (BM), siendo

responsable de la ejecución el Colegio de Postgraduados. En las regiones seleccionadas cohabitan grupos étnicos con costumbres, hábitos y lengua típica de cada región, que viven, en general, en un alto grado de marginalidad.

Uno de los sub-proyectos que conforman al PMSL, es el denominado "Metodología de medición de la captura del C" cuyos objetivos son contribuir a entender mejor la cantidad de C asociada a ciertos sistemas vegetales naturales y a ciertos sistemas agrícolas tradicionales y mejorados con tecnología apropiada, así como, estudiar la manera y cantidad con que estos diversos sistemas contribuyen a la captura y secuestro de C en el largo plazo. Para lograrlo se planteó la siguiente estrategia: (a) medir las cantidades de C asociadas a la biomasa vegetal y el C acumulado en el perfil de suelo en un tiempo cero (o línea base) de una serie de agroecosistemas típicos de cada región y (b) volverlos a medir después de 4 ó 5 años para ver si se ha experimentado algún cambio significativo como consecuencia del sistema evaluado, posteriormente, y mediante el uso de modelos apropiados, hacer proyecciones de largo plazo con respecto a la forma que estos depósitos de C podrían variar. Estos objetivos sólo podrían llevarse a cabo si se contara con un procedimiento estandarizado que permitiese medir el C en los mismos lugares, cada vez que se repitiera la experiencia. Además, se trata de hacer muchas mediciones en sistemas que se ubican en pendientes superiores al 30 %, para lo cual no se cuenta con experiencia previa.

## Materiales y métodos

El presente trabajo se desarrolló en tres microcuencas experimentales seleccionadas por el PMSL, ubicadas en las regiones Mazateca, Cuicateca y Mixe de la Sierra Norte del estado de Oaxaca, México. Estas microcuencas son representativas de las condiciones imperantes en aproximadamente 1 millón de hectáreas de la zona.

En la Región Mazateca se seleccionó la microcuenca denominada Santa Catarina, en el Municipio de San Jerónimo Tecoaatl, ubicada entre las coordenadas 18° 08' 57" y 18° 10' 13" de latitud norte; y 96° 53' 30" y 96° 54' 43" de longitud oeste. Su superficie es de 319 ha con una elevación de 1300 a 1900 msnm. La mayor parte de las pendientes rebasan el 30%. Los principales sistemas de manejo encontrados son: *milpa* (una forma tradicional de producción de maíz, *Zea mays* L., generalmente asociado con otras especies comestibles), pastizal, café (*Coffea arábica*) con árboles para sombra (*Inga* sp), bosque de *Alnus* y bosque de *Liquidambar*.

En la región Cuicateca, la microcuenca experimental se ubicó en Concepción Pápalo, perteneciente al municipio de mismo nombre, y se localiza entre las coordenadas 17° 50' 20" y 17° 51' 25" de latitud norte; y 96° 51' 55" y 96° 52' 35" de longitud oeste. Tiene una superficie de 147 ha con una elevación entre 1700 y 2200 msnm. Al igual que la microcuenca anterior, la mayor parte de las pendientes rebasan el 30%. Los principales sistemas de manejo encontrados en esta microcuenca fueron: milpa, pastizal, bosque de encino (*Quercus* spp).

La tercera microcuenca seleccionada, la de la Región Mixe, es conocida como Zompantle, y pertenece al Municipio de Cacalotepec. Se ubica entre las coordenadas 17° 00' 45" y 17° 01' 16" de latitud norte; y 95° 53' 53" y 95° 54' 10" de longitud oeste. Cuenta con una superficie de 32 ha y su elevación varía entre 1280 y 1520 msnm. En esta microcuenca también la mayor parte de las pendientes rebasan el 30%. Los principales sistemas de manejo de esta microcuenca fueron: milpa, bosque de encino, café y *acahuales* de diferentes edades. El *acahual* es una vegetación secundaria, que se establece después de 2 o 3 años de cultivo del suelo, cuando los productores emplean el sistema tradicional de explotación conocido como roza-tumba-quema (RTQ). La biomasa acumulada durante el periodo de descanso después de quemada, contribuye a la fertilidad del suelo.

Las condiciones climáticas, edafológicas, fisiográficas y de altitud, dentro de cada microcuenca son muy variables, lo que trae como consecuencia que se presenten una amplia variedad de tipos de vegetación en cada microcuenca.

En cada microcuenca se seleccionaron sitios de observación representativos de los sistemas de vegetación natural y de los de cultivos permanentes, dominantes en las pendientes mayores y menores del 30%. Además, se establecieron parcelas de producción agrícola con los cultivos habituales de la zona (*milpa* de maíz y/o frijol) manejados con el sistema tradicional de los productores. Para identificar los grupos de sistemas forestales y agrícolas, las parcelas se dividieron en sistemas: naturales, agrícolas permanentes, agrícolas mixtos y agrícolas anuales. Los sistemas de vegetación no son puros y se denominaron en función de la especie dominante. El detalle de cada uno, se describe a continuación.

## Sistemas de Vegetación

### Naturales

**Bosque de liquidámbar.** Representa un tipo de vegetación típico del bosque mesófilo de montaña, en

donde predomina principalmente la especie *Liquidambar macrophylla* Oerst, aunque también se encuentran muchas otras especies arbóreas, arbustivas y herbáceas, como los helechos arborescentes y otras hojosas. El bosque seleccionado era de aproximadamente 40 años, tenía el dosel cerrado coberturas cerradas; la densidad de árboles era aproximadamente 40 m<sup>2</sup>·ha<sup>-1</sup>.

**Bosque de aile.** Este tipo de vegetación se caracteriza por la presencia dominante del género *Alnus* spp, que se encuentra asociado con otras especies, como *Rapanea* spp. y *Clethra* spp. La edad de este tipo de vegetación es variable. La especie coloniza con frecuencia los terrenos que tiene ciclos de descanso más largos en el sistema de explotación RTQ. En este experimento se seleccionaron bosques de aproximadamente 10 y más de 15 años.

**Bosque de encino.** Es un tipo de vegetación donde prácticamente más del 80 % de las especies pertenecen al género *Quercus*; este tipo de vegetación por lo general se desarrolla en parte de clima templado dentro de la microcuenca y otras veces se mezcla con árboles de pino (*Pinus oaxacana* y *P. oocarpa*, entre otras) que fueron, en el origen, la vegetación dominante en las partes altas.

**Acahual.** Este tipo de vegetación presenta diferentes estados de desarrollo, ya que los terrenos en descanso por corto periodo se transforman en *acahuales*, en donde crecen una gran mezcla de especies arbóreas, herbáceas y arbustivas. El tiempo de suspensión de las actividades agrícolas en cada terreno, puede variar de 3 hasta 10 años, de acuerdo a las necesidades del dueño de la parcela. Cuando el periodo de descanso es mayor de 10 años, el *acahual* puede transformarse en un tipo de bosque de la especie más dominante, por ejemplo en bosques de *Liquidamabar*, *Alnus* o *Quercus*.

### Agrícolas Permanentes

**Pastizal o Pradera.** Son áreas que están dedicadas al pastoreo, por lo que predominan las especies de gramíneas, algunas son naturales y otras inducidas, se ubican por lo general en las partes planas y bajas de las microcuencas.

**Café.** El cultivo de café se practica en las partes bajas de las microcuencas, donde el clima tiende a ser más tropical, en las regiones Mazateca y Mixe. La mayoría de los cafetales son de variedades criollas y para proporcionarles sombra a las plantas se utiliza al género *Inga*.

### Agrícolas Mixtos

**Muros vivos de café (Mvc).** Son parcelas experimentales ubicadas en terrenos de los mismos

productores, que se caracterizan por tener intercalada una barrera de árboles de café cada 9 m de distancia. Las plantas de café están separadas 75 cm sobre la hilera y su densidad es de aproximadamente 1400 por hectárea. En los 6 m centrales entre las franjas de árboles, se cultiva maíz, frijol o ambos, y los 3 m restantes de dicha franja corresponden a la zona de influencia de los frutales, mismos que se conducen en un sistema llamado "tatura". Cultivo y árboles son fertilizados con una cantidad suficiente de nitrógeno y fósforo en función de los rendimientos esperados en cada microcuena. Los residuos de la cosecha se alinean a lo largo de las barreras de árboles para formar una especie de filtro y evitar la pérdida de suelo. Se espera que con el tiempo y el movimiento de la tierra poco a poco se forme una terraza.

**Muros vivos de durazno (Mvd).** Son parcelas similares a las anteriores sólo que se plantaron duraznos de la variedad Diamante, en lugar de café, se manejan de la misma manera que las anteriores.

#### **Agrícolas Anuales**

**Labranza de conservación (LC).** Estas parcelas experimentales se establecieron en terrenos de los productores cooperantes, tienen 9 x 9 m (triplicadas). En ellas se siembra maíz manualmente, el que se maneja mediante el concepto de labranza de conservación; esto es, no se realiza ninguna actividad mecánica en el terreno y después de la cosecha los residuos del cultivo son dejados sobre el terreno. La fertilización es la recomendada para la zona.

**Labranza tradicional (LT).** Se refiere a parcelas de iguales dimensiones que las anteriores que se cultivan de acuerdo a las costumbres de los productores cooperantes, por lo que hay ligeras diferencias en cuanto a, preparación del terreno, métodos de siembra (tracción animal en las pendientes menores y manual en las mayores) y en la cosecha. En estas parcelas los residuos son retirados por los productores para ser usados como forraje para los animales.

#### **Muestreo de la parte aérea de los sistemas.**

En los sitios con vegetación natural boscosa y cultivos agrícolas permanentes se seleccionaron, al azar, cinco parcelas de 4 x 25 m cada una, en lugares representativos de la condición que se analizaba. La metodología empleada en este caso es una variación de la propuesta de Woerner y Palm (1998) y Kotto-Same *et al.*, (1997). Los vértices de las parcelas, y en algunos casos los centros de los extremos fueron georeferenciados y marcados permanentemente con barras metálicas enterradas, mismas que pueden ser

localizadas, con posterioridad, con un detector de metales.

Las parcelas experimentales con cultivos anuales y mixtos fueron todas de 9 metros de longitud, pero el ancho de las mismas varió en función de los tratamientos agronómicos establecidos en los sitios. Estos tratamientos se repitieron tres veces. Al igual que en el caso anterior los vértices fueron georeferenciados.

**Biomasa aérea de bosques y cultivos agrícolas permanentes.** Para realizar esta estimación total de C en árboles mayores de 2.5 cm de diámetro en los sistemas de bosques y agrícolas permanentes, fue necesario emplear ecuaciones alométricas las cuales se generaron con información colectada *in situ*. Antes de derribar algunos árboles de las especies dominantes, se les midió su diámetro normal (DN), su altura (H) y la cobertura de copa. El fuste de cada árbol se dividió en siete partes (tres correspondiente al tronco y cuatro a la sección de la copa) y cada una de estas se pesó en fresco en el campo. Se tomaron probetas (rodajas de aproximadamente 5 cm de espesor) del tronco: en la base de éste, a la altura de 1.3 m y otra a la mitad de la distancia entre el punto de medida del DN y la base de la copa, las que también se pesaron en campo. La copa se dividió en cuatro secciones y de la base de cada sección a lo largo del fuste, se obtuvo de manera aleatoria una probeta. Además, de cada sección de la copa se seleccionó una rama la cual se pesó con hojas en campo y se trajo integra al laboratorio para obtener su peso seco. Los árboles más pequeños (< de 2.5 cm de DN) se cortaron, pesaron en campo y transportaron completos al laboratorio para obtener su peso seco.

En el laboratorio, tanto las probetas, las ramas, como los árboles completos menores de 2.5 cm de DN, se secaron a 75 °C durante 48 h con el fin de obtener el peso seco. Se calculó el porcentaje de humedad de cada componente, el cual se utilizó para calcular el peso seco de las partes que quedaron en el campo y estimar finalmente el peso seco total de cada árbol.

El peso seco total por árbol > 2.5 cm de cada especie, se relacionó con su DN y se procedió a ajustar un modelo que proviene de la función de crecimiento alométrica y que expresado en su forma exponencial es:

$$Y=aX^b,$$

en donde Y es la biomasa en kilos, X es el DN en centímetros, a y b son los parámetros a estimar. En su forma lineal la función se expresa de la siguiente manera:

$$\ln(Y)=\ln(a)+b \ln(X).$$

Para estimar la biomasa de los árboles en cada parcela, se midió el DN de todos los árboles >2.5 cm de DN incluidos en la parcela y se les calculó la biomasa mediante la ecuación ajustada de acuerdo a la especie. La suma de la biomasa correspondiente a cada una de las especie, constituyó la biomasa árboles de la parcela. Algunas de las muestras obtenidas tanto de las probetas como de las ramas de cada especie, se molieron y fueron analizadas para determinar su concentración de C.

Para determinar la biomasa de la vegetación de hierbas, arbustos y árboles con DN < 2.5cm, en las parcelas de sistema de vegetación natural boscosa y las parcelas agrícolas con cultivos permanentes, se cosechó toda la vegetación presente en dos cuadros de 1 m<sup>2</sup> cada uno, seleccionados al azar dentro de las cinco repeticiones. El centro de estos cuadros se marcó permanentemente con barras metálicas enterradas, para posteriormente tomar en ese mismo lugar las muestras de suelo para el análisis del C orgánico y de raíces. En el caso de las parcelas con cultivos agrícolas las hierbas se colectaron en superficies de 30 x 30 cm, a razón de una muestra por cada repetición.

El material vegetal herbáceo y los arbustos < 2.5 cm de diámetro colectado en campo, se trasladaron al laboratorio y se secaron en estufa a 80 °C para estimar el peso seco y calcular la biomasa. Algunas muestras de estos materiales se molieron y analizaron para C.

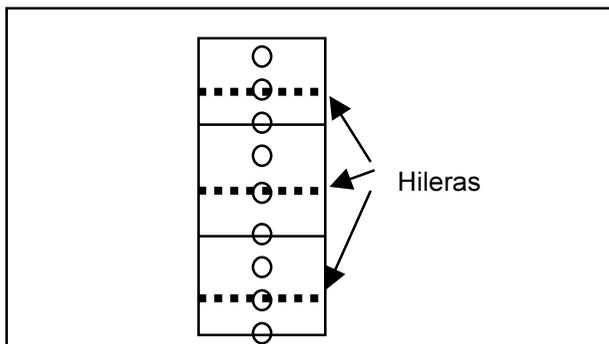
**Biomasa aérea de cultivos agrícolas y mixtos.** Para estimar la biomasa de la parte aérea de los cultivos anuales, se pesaron en el campo, a la madurez, todas las plantas existentes en áreas seleccionadas de muestreo. Se tomaron muestras representativas de las mismas para determinarles su porcentaje de humedad y después se molieron para medir el porcentaje de C en ellas. Para estimar el incremento de biomasa de los árboles frutales se estableció un modelo alométrico, de manera similar al descrito para los árboles > de 10 cm. La biomasa retirada

en las podas sucesivas fue medida y agregada a la biomasa acumulado por los árboles.

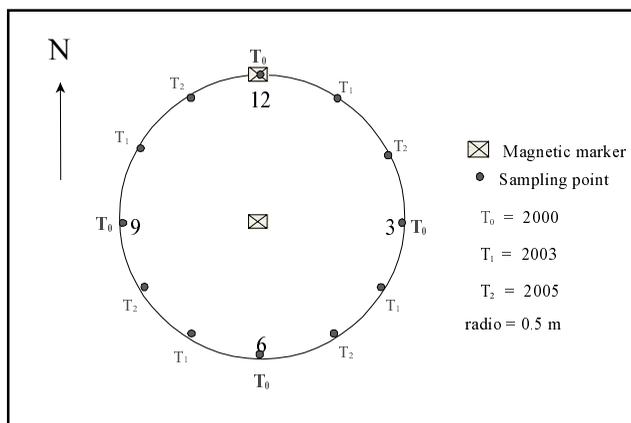
Para determinar la biomasa de la hojarasca o mantillo se seleccionó un cuadro menor de 0.5 x 0.5 m (0.25 m<sup>2</sup>) ubicado dentro de cada uno de los dos cuadros de 1 x 1 m ya señalados, donde se colectó todo el mantillo (incluyendo los pastos y la flora a ras de suelo y los residuos de las plantas). Este material se trasladó al laboratorio y se secó en estufa a 80 °C para obtener la biomasa seca. Posteriormente este material se molió (malla 30) y algunas de las muestras de cada sistema ya fueron analizadas para determinar su concentración de C. Al inicio del experimento no se conservó una capa de mantillo en las parcelas con cultivos agrícolas, por lo cual ésta parte no fue muestreada. Pero se espera que en los tratamientos con labranza cero se comience a formar mantillo con el transcurso del tiempo y en tal caso será considerada.

**Muestreo de la parte subterránea.**

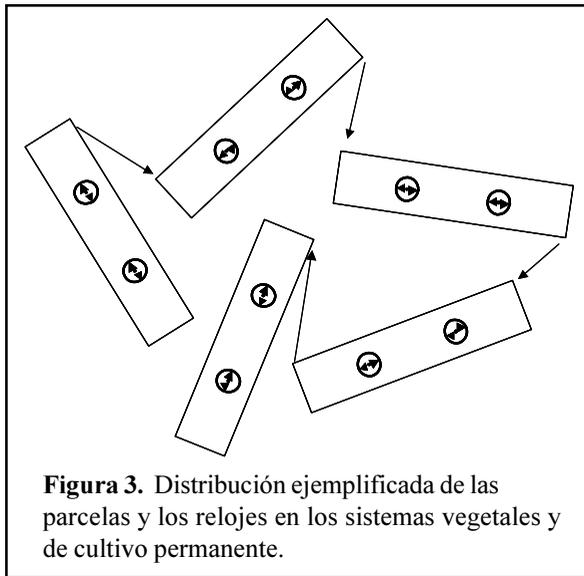
**Muestreo de suelo en las parcelas de experimentación.** Los tratamientos milpa con labranza tradicional, milpa con labranza de conservación y terrazas de muro vivo se muestrearon en nueve puntos (tres por repetición) (Figura 1). Este esquema permite estimar el movimiento de suelo por erosión, deposición, y determinar la captura de C asociado con el efecto de tratamiento agronómico a lo largo de la pendiente. En cada punto de muestreo se diseñó un sistema similar a la forma de un reloj de 1 m de diámetro con la finalidad de realizar muestreos subsecuentes en el mismo sitio físico del terreno, para el presente estudio se muestrearon dos puntos (las posiciones correspondientes a la 12 y 6 horas) tal como se describe más adelante (Figura 2).



**Figura 1.** Ubicación de los relojes en las tres repeticiones de las parcelas de los cultivos agrícolas.



**Figura 2.** Esquema del “reloj” de muestreo para medir carbono en el suelo



**Figura 3.** Distribución ejemplificada de las parcelas y los relojes en los sistemas vegetales y de cultivo permanente.

**Muestreo de suelo en las parcelas con bosque y cultivos permanentes.** En cada parcela de este tipo (cinco repeticiones por sitio) se colectaron muestras en los relojes ubicados de acuerdo a la Figura 3.

El muestreo de suelo en el tiempo y espacio se basó en un sistema circular de reloj con diámetro de 1 m, que se ubicó dentro de la unidad básica de observación (repetición de un tratamiento). Con ayuda de un compás se hizo coincidir las 12 hr del reloj con el norte magnético. El centro de este reloj se georeferenció y se marcó con una varilla de hierro que se enterró en el suelo.

Los cálculos de la cantidad de C capturado requieren de la medición exacta de la densidad aparente del suelo.

Por lo tanto, la integridad científica de esta investigación se basó en la conservación de la masa total de suelo obtenida durante el muestreo de terreno hasta el pesado de la muestra en el laboratorio. La masa de suelo seca al horno no consideró el peso de piedras, fragmentos de plantas y animales que no pasaron el tamiz de 2 mm. El volumen de suelo muestreado se corrigió por el volumen ocupado por piedras y raíces. Para ello se consideraron densidades de 2.4 y 0.3 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente.

Para calcular la biomasa subterránea se usaron las mismas muestras obtenidas para determinar el C del suelo, una vez que se llevaron al laboratorio se procedió a retirar en forma manual, todas las raíces visibles simple vista, después éstas se secaron a 70 °C y se pesaron.

### Análisis de C

Las muestras de suelo recibidas del terreno se registraron a su llegada al laboratorio. Estas se procesaron y prepararon para el análisis químico de acuerdo al esquema preestablecido. Las muestras secas de suelo se almacenaron en envases plásticos etiquetados con tapa y se guardaron hasta el momento del análisis. La determinación del contenido de C orgánico (CO) se hizo por combustión seca en un analizador automático de C Shimadzu TOC 5000-A.

### Resultados y discusión.

#### Región Mazateca

En el Cuadro 1 se presenta la cantidad de C acumulada en los diferentes sistemas de vegetación dominante en las laderas de la región Mazateca.

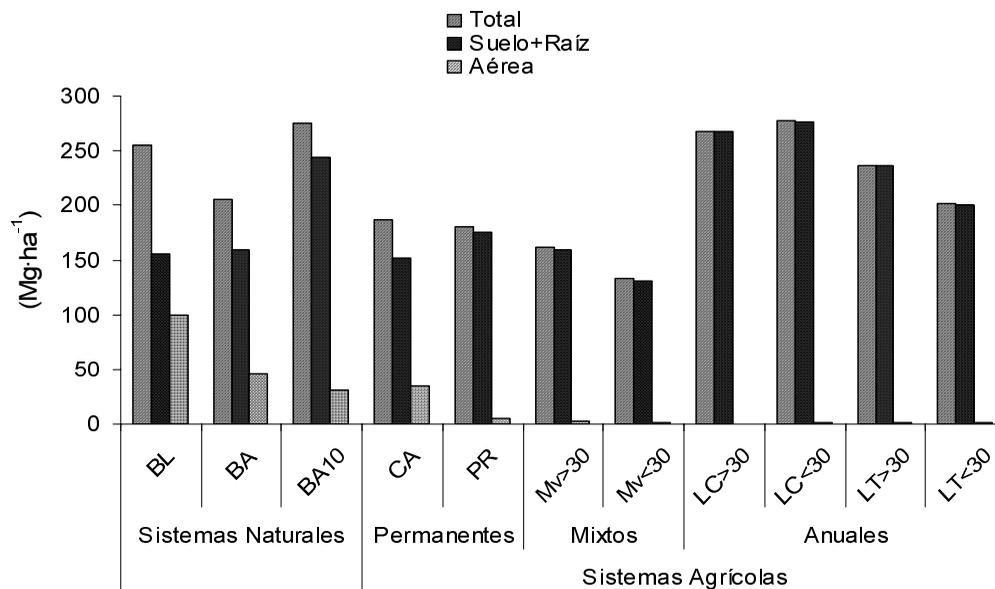
**Cuadro 1.** Contenido de carbono orgánico en la parte aérea y sus compartimentos, raíz y suelo (0 a 105 cm), en sistemas de vegetación dominantes en la región Mazateca, Oaxaca, México.

| Componente         | Sistemas Naturales  |              |              | Sistemas Agrícolas |             |             |             |             |             |             |             |
|--------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                    | BL                  | BA           | BA10         | permanentes        |             | mixtos      |             | anuales     |             |             |             |
|                    |                     |              |              | CA                 | PR          | Mv>30       | Mv<30       | LC>30       | LC<30       | LT>30       | LT<30       |
|                    | Mg.ha <sup>-1</sup> |              |              |                    |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Parte aérea</b> | <b>99.50</b>        | <b>46.31</b> | <b>31.02</b> | <b>34.51</b>       | <b>5.36</b> | <b>6.11</b> | <b>3.51</b> | <b>6.06</b> | <b>3.51</b> | <b>3.23</b> | <b>1.85</b> |
| mantillo           | 5.87                | 8.42         | 12.56        | 9.16               | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| hierbas-arbustos   | 0.48                | 0.98         | 3.03         | 0.68               | 5.36        | 1.29        | 1.63        | 0.62        | 1.24        | 0.97        | 1.37        |
| árboles            | 93.15               | 36.90        | 15.42        | 24.67              | 0           | 1.35        | *           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| paja               | 0                   | 0            | 0            | 0                  | 0           | 3.47        | 1.88        | 5.44        | 2.27        | 2.26        | 0.48        |
| <b>Raíz</b>        | <b>3.32</b>         | <b>2.31</b>  | <b>4.14</b>  | <b>4.79</b>        | <b>1.38</b> | <b>1.53</b> | <b>2.92</b> | <b>2.31</b> | <b>4.29</b> | <b>2.03</b> | <b>5.52</b> |
| <b>Suelo</b>       | <b>152</b>          | <b>156</b>   | <b>240</b>   | <b>148</b>         | <b>174</b>  | <b>158</b>  | <b>128</b>  | <b>266</b>  | <b>273</b>  | <b>235</b>  | <b>195</b>  |
| <b>Total</b>       | <b>255</b>          | <b>205</b>   | <b>275</b>   | <b>187</b>         | <b>181</b>  | <b>166</b>  | <b>135</b>  | <b>274</b>  | <b>281</b>  | <b>240</b>  | <b>202</b>  |

\* No se cuenta con la información, debido a que se replantó en el 2001.

BL = Bosque de liquidambar; BA = B. de aile de 15 años; BA10 = B. aile de 10 años; PR = Pradera;

Mv = Muros vivos; LC = Labranza de conservación y LT = labranza tradicional.



**Figura 4.** Contenido total de carbono y su distribución en la parte aérea y subterránea, en sistemas de vegetación dominantes en la región Mazateca, Oaxaca, México

El C total presente en los sistemas naturales rebasó los 200 Mg ha<sup>-1</sup>, siendo el BA10 (bosque de aile de 10 años) el con mayor cantidad (275 Mg ha<sup>-1</sup>C). Los sitios BL (bosque de liquidámbar de aproximadamente 40 años) y el otro bosque de aile (BA de aproximadamente 15 años) tuvieron 255 y 205 Mg ha<sup>-1</sup>C, respectivamente.

El suelo fue el componente del sistema que más C aportó en el caso que del BA10, con 240 Mg ha<sup>-1</sup>C; esto es, casi el 87 % del C del sistema se encontraba en este componente. El C presente en el componente suelo en los sistemas BL y el BA fue de sólo 156 y 152 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, lo cual representa el 60 y 76 % del total de C en esos sistemas. Estos resultados señalan sin ambages que el suelo es el gran almacén de C en los sistemas alterados de vegetación natural en las laderas del sureste mexicano. Es difícil establecer las razones por qué ocurren tan marcadas diferencias entre los sistemas de vegetación natural y por qué hay menos C en el suelo de los bosques de mayor edad, pero el manejo de éste, en especial durante el periodo en que fueron explotados agrícolamente, la colecta ocasional de leña para combustible doméstico que realizan los campesinos, la pendiente y los procesos erosivos que se dieron en el pasado, justifican parte de ellas. El buen desarrollo del BA10 y la consecuente acumulación de C en el suelo pueden explicarse porque esta especie establece una

asociación simbiótica con *Frankia sp.*, que hace que el N no sea un elemento que pudiese limitar su desarrollo. De hecho la especie se muestra como una agresiva colonizadora después de que el bosque original es destruido.

Contrariamente a lo que ocurre en el suelo, el C acumulado en el componente aéreo (árboles, mantillo, arbustos) fue mayor en el BL (casi 100 Mg ha<sup>-1</sup> C) que en BA y BA10 (46 y 31 Mg ha<sup>-1</sup> C, respectivamente). Tal resultado es congruente con la edad de estos sistemas de vegetación. En términos generales, se puede señalar que, la vegetación de ladera alterada y secundaria, tiene una capacidad de secuestro de aproximadamente 2.5 a 3 Mg ha<sup>-1</sup> C año<sup>-1</sup>, en los primeros 40 años de vida. Esta cifra se ubica dentro del rango bajo de datos reportados en la literatura (2 a 9 Mg ha<sup>-1</sup> C año<sup>-1</sup>) para bosques tropicales (Szott et al., 1994; Houghton, 1995).

La Figura 4 muestra los contenidos totales de C acumulado en los diferentes sistemas de vegetación, e incluye su distribución en parte aérea y subterránea, sin hacer distinción de si el C en subterráneo se encuentra en el compartimiento raíces o el suelo mineral. Si se compara el C total de los sistemas naturales el de los sistemas agrícolas, se concluye que los sistemas agrícolas anuales acumularon aproximadamente la misma cantidad de C total que los bosques, mientras que los

sistema agrícola permanentes y mixtos, un poco menos. La diferencia entre los bosques y los sistemas agrícolas anuales fue que en los últimos prácticamente todo el C del sistema estaba acumulado en el suelo y el C de la parte aérea de éstos fue prácticamente insignificante. La gran capacidad de captura de C en el suelo por los sistemas agrícolas tradicionales, es un hecho que aparentemente no ha sido reportado en la literatura.

Los sistemas agrícolas mixtos y permanentes fueron los que acumularon menor cantidad de carbono. Nuevamente en este caso, la mayoría del C se encontraba en el componente suelo. La excepción la constituyó en café con sombra donde la parte aérea contribuyó con aproximadamente 20 % del C total en el sistema. Los árboles frutales, plantados en hileras y con una alta densidad, contribuyeron a secuestrar 1.4 Mg ha<sup>-1</sup> C el primer año después de plantados. Se espera que en los años siguientes la tasa de secuestro de C sea un poco más elevada, cuando comience la ramificación de los árboles.

La contribución de los componentes mantillo, hierbas y arbustos y raíces al contenido total de C de los sistemas fue mínima, en comparación con la vegetación arbórea y el suelo.

El alto contenido de C en la parte subterránea de los terrenos agrícolas con cultivos anuales pudiera deberse a que estos son de buena calidad, si es que consideramos el contenido de C en el suelo como un índice de ésta, ya que de no ser así, habrían sido abandonados, como posiblemente ocurrió con el BL y el BA. En los terrenos agrícolas, los productores aplican irregularmente estiércol y desperdicios, sin embargo, las pequeñas cantidades adicionadas no explicarían las grandes diferencias de C acumulado en el suelo. El principal cultivo en las parcelas agrícolas es el maíz, el cual se siembra años con año. El

maíz tiene un sistema radical que puede alcanzar profundidades superiores a 1 m, particularmente en condiciones de producción dependiente de la lluvia, lo cual debe considerarse como un mecanismo de transporte de fotosintatos aéreos a la parte subterránea.

### Región Cuicateca

En el Cuadro 2 se presentan los resultados del C acumulado en la parte aérea y sus diferentes compartimentos, en la raíz y en el suelo (hasta una profundidad de 105 cm) en los sistemas de vegetación natural y agrícolas de la región Cuicateca. En esta microcuenca se registró la menor cantidad de C acumulado, promedio de todos los sistemas analizados, de las tres regiones. Una de las razones es que la profundidad del suelo fue en la mayoría de los sitios, somera. Sólo en algunos sistemas PR y Mv(G) fue posible alcanzar la profundidad de 105 m, por eso es que ambas tuvieron las mayores cantidades de C en el suelo (90 y 117 Mg ha<sup>-1</sup> C, respectivamente) En los sitios restantes, la presencia de un manto rocoso impidió tomar muestras en las profundidades inferiores. Los sistemas de vegetación con mayor y menor cantidad de C en el suelo (117 y 45 Mg ha<sup>-1</sup>) fueron Mv(G) y BE, respectivamente. El BE se ubica en un terreno degradado que pudo haber sido sobreexplotado y abandonado en el pasado y ahora se está recuperando lentamente; prácticamente la única vegetación que ha prosperado en el sitio es *Quercus sp.* En general, los sistemas con árboles, nativos o cultivados, fueron los presentaron mayor contenido de C total y en el suelo.

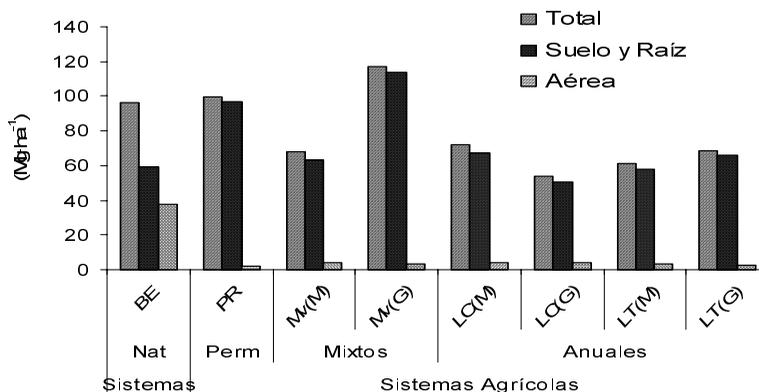
En la Figura 5 se presenta el contenido total de C por sistema y la distribución del C por componente aéreo y subterráneo (raíces más suelo). Sólo en el BE la contribución de C de la parte aérea al C total del sistema

**Cuadro 2.** Contenido de carbono orgánico (Mg.ha<sup>-1</sup>) en la parte aérea (y sus compartimentos), la raíz y el suelo (0 a 105 cm), en sistemas de vegetación dominantes en la región Cuicateca, Oaxaca, México.

| Componente         | Sistemas Naturales   |             | Sistemas Agrícolas |             |             |             |             |             |
|--------------------|----------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                    | BE                   | PR          | mixtos             |             | anuales     |             |             |             |
|                    |                      |             | Mv(M) <sup>1</sup> | Mv(G)       | LC(M)       | LC(G)       | LT(M)       | LT(G)       |
|                    | Mg. ha <sup>-1</sup> |             |                    |             |             |             |             |             |
| <b>Parte aérea</b> | <b>37.60</b>         | <b>2.18</b> | <b>4.35</b>        | <b>3.37</b> | <b>4.16</b> | <b>3.80</b> | <b>3.31</b> | <b>2.70</b> |
| mantillo           | 7.62                 | 0           | 0                  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| hierbas-arbustos   | 0                    | 2.18        | 0.21               | 0.55        | 0.63        | 0.64        | 0.32        | 0.45        |
| árboles            | 29.98                | 0           | 0.74               | 0.03        | 0           | 0           | 0           | 0           |
| paja               | 0                    | 0           | 3.40               | 2.78        | 3.53        | 3.16        | 2.99        | 2.25        |
| <b>Raíz</b>        | <b>14.42</b>         | <b>6.07</b> | <b>0.67</b>        | <b>1.03</b> | <b>1.94</b> | <b>1.21</b> | <b>0.60</b> | <b>0.59</b> |
| <b>Suelo</b>       | <b>45</b>            | <b>91</b>   | <b>63</b>          | <b>113</b>  | <b>66</b>   | <b>49</b>   | <b>57</b>   | <b>65</b>   |
| <b>Total</b>       | <b>97</b>            | <b>99</b>   | <b>68</b>          | <b>117</b>  | <b>72</b>   | <b>54</b>   | <b>61</b>   | <b>68</b>   |

BE = B. de encino; PR = pradera; Mv = Muros vivos; LC = Labranza de conservación tradicional y LT = labranza tradicional.

<sup>1</sup> Las Letras entre paréntesis identifican al productor; M = Mariscal y G = Gómez.



**Figura 5** Contenido total de carbono y su distribución en la parte aérea y subterránea en sistemas de vegetación dominantes en la región Cuicateca, Oaxaca, México

fue significativa. En el resto de los casos la mayoría del C secuestrado se encontraba en el suelo, lo cual refuerza lo encontrado en la microcuenca de la región Mazateca.

Es importante destacar que en esta región, la cantidad de C total acumulada en los sistemas agrícolas anuales fue notoriamente inferior al promedio del C encontrado en los restos de los sistemas (bosques, mixtos y permanentes). Este hecho se puede atribuir a que el establecimiento de estos sistemas sólo es posible en suelos con mayor profundidad. Ello significa que la profundidad del suelo es un indicador interesante en cuanto a la cantidad de C que puede acumular un sistema cualquiera.

El sistema que mayor cantidad de C registró es la parcela de Mv(G) a pesar de que apenas cuenta con un año de establecida. El sitio de esta parcela es el de mayor profundidad en la microcuenca. Si los árboles de durazno crecen como se tiene previsto, este sistema tendrá un alto potencial para capturar C en esta región ya que el suelo contiene, además, baja concentración inicial de carbono. El bosque de encino también representa un potencial alto para el secuestro de C por la misma razón anterior. El potencial de secuestro en los sistemas agrícolas anuales es limitado por la escasa profundidad, debida principalmente al elevado grado de erosión que presentan los sitios, donde se emplea tracción animal para preparar el suelo antes de la siembra. El grado de erosión es menor en aquellos sitios, de otras microcuencas, en que las albores agrícolas se practican manualmente.

### Región Mixe

En el Cuadro 3 se muestran los resultados del C almacenado en los diferentes sistemas de vegetación de la región Mixe.

En esta región sorprende la cantidad de C total secuestrado por los sistemas agrícolas anuales (274 a 305 Mg.ha<sup>-1</sup>); la gran mayoría del cual se encuentra en la parte subterránea. Estos sistemas prácticamente duplicaron la cantidad de C total de los sistemas vegetales naturales (133 a 199 Mg.ha<sup>-1</sup>), que en este caso eran *acahuales* de escasa edad.

El C secuestrado en la parte aérea de los *acahuales* de 2, 7 y 10 años fue 10, 24 y 25 Mg ha<sup>-1</sup>, lo cual significa que este tipo de vegetación tiene un potencial de captura de C de 2.5 a 5 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, un valor muy similar al observado en los sistemas de vegetación natural boscosa de la región Mazateca.

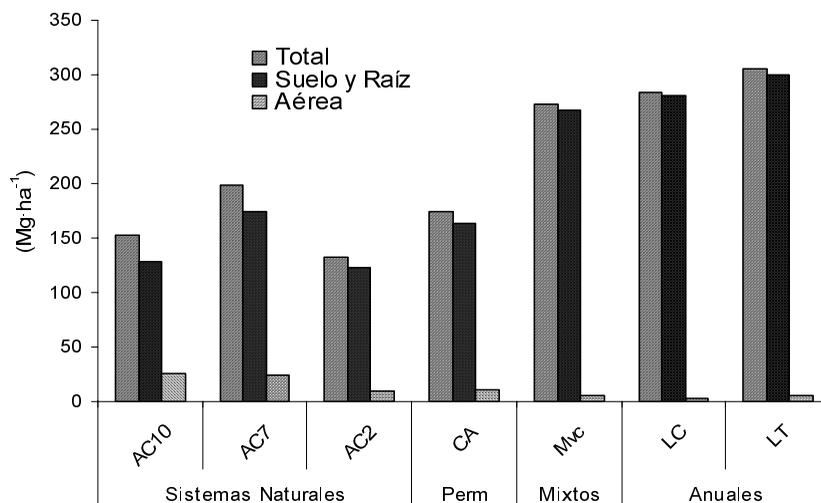
### Conclusiones

El C secuestrado por sistemas de vegetación representativos de las condiciones existentes en las laderas de la Sierra Norte de Oaxaca, México, caracterizado por pendientes de 25 a más de 50 %, agricultura tradicional (cultivos anuales, roza-tumba-quema y bosques secundarios alterados), altitud de 1300 a 2200 m y condiciones semitropicales en las partes bajas y templadas en las partes altas, variaron entre 54 a 306 Mg ha<sup>-1</sup>.

**Cuadro 3.** Contenido de carbono orgánico ( $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), en la parte aérea y sus compartimentos, raíz y suelo (0 a 105 cm), en sistemas de vegetación dominantes en la región Mixe, Oaxaca, México.

| Componente         | Sistemas Naturales             |              |             | Sistemas Agrícolas |               |                  |             |
|--------------------|--------------------------------|--------------|-------------|--------------------|---------------|------------------|-------------|
|                    | AC10                           | AC7          | AC2         | permanente<br>CA   | mixtos<br>Mvc | anuales<br>LC LT |             |
|                    | $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ |              |             |                    |               |                  |             |
| <b>Parte aérea</b> | <b>25.04</b>                   | <b>24.12</b> | <b>9.86</b> | <b>11.23</b>       | <b>5.60</b>   | <b>3.15</b>      | <b>4.82</b> |
| mantillo           | 7.32                           | 6.72         | 3.29        | 2.02               | 0             | 0                | 0           |
| hierbas-arbustos   | 4.28                           | 1.91         | 6.57        | 0.28               | 0.87          | 1.01             | 1.01        |
| árboles            | 13.44                          | 15.48        | 0           | 8.93               | 0.18          | 0                | 0           |
| paja               | 0                              | 0            | 0           | 0                  | 4.55          | 2.14             | 3.81        |
| <b>Raíz</b>        | <b>7.78</b>                    | <b>5.14</b>  | <b>3.76</b> | <b>4.00</b>        | <b>1.93</b>   | <b>2.78</b>      | <b>2.89</b> |
| <b>Suelo</b>       | <b>120</b>                     | <b>169</b>   | <b>119</b>  | <b>160</b>         | <b>266</b>    | <b>278</b>       | <b>298</b>  |
| <b>Total</b>       | <b>153</b>                     | <b>199</b>   | <b>133</b>  | <b>175</b>         | <b>273</b>    | <b>284</b>       | <b>306</b>  |

AC2, AC7 y AC10 = *Acahuales* de 2, 7 y 10 años; CA = Café; Mvc = Muros vivos de café; LC = Labranza de conservación; LT = Labranza tradicional.

**Figura 6.** Contenido total de carbono y su distribución en la parte aérea y subterránea en sistemas de vegetación dominantes en la región Mixe, Oaxaca, México.

La gran mayoría del C de los sistemas de vegetación estudiados se encontró asociado con el componente subterráneo y particularmente con el suelo. El contenido de C total en los sistemas agrícolas anuales, en aquellos casos en que el suelo era profundo, fue igual o superior al contenido de C en los sistemas de vegetación natural. En apariencia la acumulación de C en el suelo está más relacionada con la profundidad del suelo que con tipo de vegetación que en él crece.

Se logró estimar que la capacidad de captura de C de los sistemas de vegetación natural (bosques y *acahuales*) y de los agrícolas permanentes (café) y agrícolas mixtos (terrazas de muro vivo con durazno y café), en las condiciones ecológicas descritas, fue de 2.5 a 5  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ .

Los sistemas agrícolas tradicionales acumulan, en general, tanto C como los sistemas forestales. La principal diferencia es que en estos últimos el C se encuentra almacenado en la biomasa y en los primeros en el suelo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Global Environment Facility (GEF), al Banco Mundial (BM), a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México (SAGARPA) al Gobierno del Estado de Oaxaca y a todas las personas que a través de sus esfuerzos de coordinación y trabajo colaboraron a la realización de esta investigación.

## Literatura citada

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1996. Climate change 1995. Impact adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. R. Watson, M. Zinyowera and R. Moss (eds.). Cambridge University Press.
- Agriculture and Agri-Food Canada. 1998. The health of our air. Toward sustainable agriculture in Canada. Compiled and edited by H. Janzen, R.L. Desjardins, J. Asselin and B. Grace. Research Branch. Publication 1981/E.
- Herrick, J. E. y Wander, M. M. 1998. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: the importance of distribution, composition, and soil biological activity. Pp 405-425. *In* Lal, R.; Kimble, J. M.; Follett, R. F. y Stewart, B. A. [eds.] Soil processes and the carbon cycle. CRC Press.
- Houghton, R. A. 1997. Terrestrial carbon storage: global lessons from Amazonian research. *Ciencia e Cultura* 49: 58-72
- Kotto-Same, J., P. L. Woome, A. Maukam, and L. Zapfpack. 1997. Carbon dynamics in slash-and-burn agriculture and land use alternatives of humid forest zone in Cameroon. *Agriculture Ecosystem and Environments* 65: 245-256.
- Lal, R. 1998. Land use and soil management effects on soil organic matter dynamics on alfisols in Western Nigeria. Pp. 109-126. *In* Lal, R.; Kimble, J. M.; Follett, R. F. y Stewart, B. A. [eds.] Soil processes and the carbon cycle. CRC Press.
- Szott, L. T., C. A. Palm, and C. B. Davey. 1994. Biomass and litter accumulation under managed and natural tropical fallows. *Forest Ecology and Management* 67: 177-190-
- Woome, P.L., C.A. Palm, J. Alegre, C. Castilla, D.G. Cordeiro, K. Hairiah, J. Kotto-Same, A. Moukam, A. Reise, V. Rodrigues, and M. van Noordwijk. 1999. Land Use and Carbon Pool in Soils of Africa. Slash and Burn Effects on Carbon Stocks in the Humid Tropics. *In*: R. Lal., J. M. Kimble, and B. A. Stewart (eds.). CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, Florida

## Estimación de la Fotosíntesis en Plantas Completas y Validación de un Modelo Matemático para el Cafeto *Coffea arabica* L.<sup>1</sup>

Luis F. Gómez<sup>2</sup>; Esther C. Montoya<sup>3</sup>; Yamel López<sup>4</sup>; Néstor M. Riaño<sup>5,\*</sup>

### Resumen

En 1999, Quiroga *et al* formularon una adaptación para *Coffea* sp. del modelo de simulación de la fotosíntesis desarrollado por Goudriaan (1986), el cual permite calcular la asimilación de CO<sub>2</sub> por plantas completas de café. Con el objetivo de verificar si el modelo adaptado estima adecuadamente los valores reales de  $A_{pl}$ , se llevó a cabo un estudio sobre plantas de *Coffea arabica* L. cv. Caturra de 14 meses de edad, en las instalaciones de Cenicafé (Manizales, Colombia). Se compararon tres metodologías: (A) Medición de la fotosíntesis neta en plantas completas ( $A_{pl}$ ) en condiciones semicontroladas bajo un sistema de cámaras desarrollado por los autores. Los valores de  $A_{pl}$  obtenidos se utilizaron como referencia para establecer el ajuste de los estimados por simulación. (B) Estimación de  $A_{pl}$  mediante el método de Goudriaan, a partir de datos de fotosíntesis instantánea en hojas individuales en tres profundidades del dosel y en tres horas (07:00 - 12:00 y 17:00) asumiendo un comportamiento unimodal de la fotosíntesis y en cinco horas (07:00 - 09:00 - 13:00 - 15:00 y 17:00) siguiendo el comportamiento bimodal establecido por otros investigadores. (C) Estimación de  $A_{pl}$  mediante el modelo de Goudriaan (1986) adaptado para el cafeto. Los resultados confirman el comportamiento bimodal de  $A_{pl}$  y permiten establecer que el modelo de Goudriaan (1986) adaptado para cafeto por Quiroga *et al* (1999) estima con un alto grado de ajuste ( $p < 0.0001$ ) la fotosíntesis de la planta completa. Por otro lado, el alto nivel de ajuste entre los datos observados y los simulados permite su inclusión como una subrutina dentro del modelo general de simulación del crecimiento y productividad del cultivo de café y a su vez calcular el CO<sub>2</sub> asimilado por el cultivo. El sistema de intercambio gaseoso diseñado permitirá en el futuro la realización de trabajos tendientes a determinar la captura de CO<sub>2</sub> en especies forestales de interés para la zona cafetera colombiana tales como *Guadua angustifolia* Kunt, *Eucaliptus grandis*, *Cordia alliodora* y *Tabebuia rosea* entre otros.

### Introducción

El cultivo del café (*Coffea arabica* L.) ha sido el principal renglón agrícola en Colombia y el mayor factor de desarrollo y sustento para 560.000 familias cafeteras que ocupan un poco más de 800.000 hectáreas. Además, genera ingresos indirectos para otros 2.000.000 de personas.

La mayoría de los estudios sobre la actividad fotosintética en diferentes especies se han realizado sobre hojas individuales, sin tener en cuenta que, por diversos factores, lo que ocurra en una hoja puede no ser en realidad lo que está ocurriendo para todas las hojas de la misma planta y del cultivo en general. La estimación de la fijación del CO<sub>2</sub> atmosférico por la planta

individual completa o por una población se ha llevado a cabo mediante métodos matemáticos y estadísticos que utilizan la respuesta fotosintética instantánea de la hoja individual a la radiación fotosintéticamente activa (*RFA*), la distribución del follaje de acuerdo con la arquitectura de la especie y la forma como la *RFA* es interceptada y distribuida a través del dosel (Wit 1965, 1978; Spitters 1986; Goudriaan 1986). Otros autores han utilizado otras variables bioquímicas, fisiológicas y físicas, para desarrollar modelos que estiman la fotosíntesis neta en plantas individuales y en comunidades vegetales (Acock 1991; Boote y Loomis 1991; Collatz *et al.* 1991; Reynolds *et al.* 1992; Amthor 1994; Anten 1997).

<sup>1</sup>Investigación realizada en el Centro Nacional de Investigaciones de Café – CENICAFE, Chinchiná, Colombia.

<sup>2</sup>Ing. Agrónomo, Fisiología Vegetal; <sup>3</sup>Estadística, Biometría; <sup>4</sup>Ing. Agrónomo Ph.D., Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira; <sup>5</sup>Ing. Agrónomo Ph.D., Fisiología Vegetal. Trabajo aceptado para presentarlo en el Simposio Internacional – Medición y monitoreo de captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile, octubre 18 – 20, 2001.

\*Autor para correspondencia: email – nestorm.riano@cafedecolombia.com

La fotosíntesis es el proceso central de los modelos de simulación que estiman el crecimiento y productividad de todas las plantas (Keulen *et al.* 1982; Ritchie 1995); sin embargo, la mayor parte de los desarrollos en modelación se han llevado a cabo en plantas de ciclo anual y muy pocos en plantas perennes [Kiwi, *Actinidia deliciosa* (Buwalda y Meekings 1992); Manzano, *Malus domestica* Borkh (Lakso 1992), algunas especies forestales tropicales (Allen y Lemon 1976) y café, *Coffea arabica* L. (Quiroga *et al.* 1999)].

Los estudios sobre el comportamiento fotosintético en el café se han llevado a cabo en hojas individuales y poco se conoce en relación con la planta completa. Quiroga *et al.* (1999) desarrollaron la primera aproximación a un modelo de simulación para el crecimiento y producción del café, donde era indispensable validar el submodelo para la fotosíntesis en la planta completa. Para ello fue necesario medir la asimilación de CO<sub>2</sub> en la planta completa utilizando un sistema de intercambio gaseoso para plantas en confinamiento (Gómez y Riaño 2000) que semejan la medición en hojas individuales, teniendo como una de sus principales ventajas ser un método directo y no destructivo.

Se presentan a continuación, los resultados del diseño, evaluación y puesta a punto del sistema de intercambio gaseoso para plantas completas, así como la validación del modelo de simulación de la actividad fotosintética de la planta de café *Coffea arabica* L. desarrollado por Quiroga *et al.* (1999).

## Materiales y métodos

### Localización

El estudio se llevó a cabo en el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé (Chinchiná, Colombia), 05° 01 N, 75° 36 W, 1425 m de altitud, precipitación anual acumulada 2833.7 mm, temperatura mínima promedio anual 16.1°C, temperatura máxima promedio anual 25.3°C, temperatura media promedio anual 19.9°C, humedad relativa promedio anual 84.1% y brillo solar anual acumulado 1330.4 horas (Cenicafé 1999).

### Material vegetal y condiciones de crecimiento

Se cultivaron plantas de *Coffea arabica* L. cv. Caturra, bajo condiciones de vivero por 5 meses en bolsas de polietileno de 17 cm x 23 cm, con sustrato suelo:pulpa de café descompuesta 3:1 (v / v). Posteriormente se transplantaron al campo y luego de 6 meses se extrajeron del sitio con suelo sin disturbar y se colocaron en macetas de 30 cm de diámetro y 35 cm de altura (22 kg de

suelo) con adecuado suministro de agua y nutrientes. Las mediciones se iniciaron luego de tres meses del trasplante.

## Diseño, construcción y evaluación del sistema de intercambio gaseoso para plantas completas

Se diseñaron y construyeron dos cámaras en plexiglás transparente, de 1.2 m x 1.2 m x 1.4 m (largo x ancho x altura, respectivamente), con 2.01 m<sup>3</sup> de volumen total, dotadas con puerta circular frontal, con un sistema de riego, con una recámara para la mezcla de gases, con sensores para la medición de la humedad relativa (*HR*), temperatura (*T*) y radiación fotosintéticamente activa (*RFA*) tanto interna como externamente. Las condiciones internas de temperatura (*T<sub>i</sub>*) y humedad relativa (*HR<sub>i</sub>*) son reguladas con un equipo convencional de aire acondicionado controlado electrónicamente para mantener las condiciones internas (*T<sub>i</sub>*, *HR<sub>i</sub>*) y externas (*T<sub>e</sub>*, *HR<sub>e</sub>*), muy próximas. Para evitar el ingreso de vapor de agua por evaporación y CO<sub>2</sub> por respiración proveniente del suelo, se adecuaron tapas plásticas a los materos, dándoles cierre hermético con envoltura plástica transparente Cristaflex™ (Gómez y Riaño, 2000).

## Modo de operación del sistema

El sistema de envío de aire hacia las cámaras se ha ido perfeccionando de tal manera que un compresor (Ingersoll-Brand) de 7.5 HP succiona aire de la atmósfera a través de tubería de PVC. El aire es almacenado en tres tanques (450 y 2 x 590 L de capacidad respectivamente), desde donde es enviado a las cámaras para las plantas y al sistema de medición como aire de referencia, a presión y flujo previamente establecidos.

El sistema de medición consta de un selector de canales ADC-GHU (*Analytical development Co. Hoddesdon-Hertz, UK*), programado para que en tiempos predeterminados envíe el aire de referencia o el aire de cada una de las cámaras a los analizadores infrarrojos (IRGA) de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O (ADC-225 MK3).

La señal electrónica de medición de cada analizador y de los sensores de *HR*, *T* y *RFA* es enviada instantáneamente a un sistema de captura de datos Hydra Logger Fluke (Data Acquisition Software) que muestra en un monitor la información adquirida en tiempo real y en tiempos predeterminados los transfiere a un PC. La información fue analizada utilizando los paquetes estadísticos SAS (*SAS Institute*) y SigmaPlot (*SPSS Inc.*).

## Actividad fotosintética

Los valores de fotosíntesis neta ( $A$ ) en función de  $RFA$  son fundamentales para la aplicación del método de Goudriaan (1986). Hay dos formas de estimar la fotosíntesis en la planta completa  $A_{pl}$ : (1) Si no se tienen datos previos acerca de las características de la especie [distribución de los ángulos de inserción de las hojas, coeficiente de extinción de la luz a través del dosel ( $k$ ), relación entre  $RFA$  y  $A$ , y comportamiento del  $IAF$  a través del tiempo], se pueden hacer mediciones diarias de  $A$  en hojas individuales en diferentes profundidades del dosel y calcular la integral ( $A_{pl}$ ) bajo las curvas generadas (2) si se tienen los valores de  $IAF$ , del coeficiente de extinción de la radiación a través del dosel, duración del día extraterrestre en horas ( $D$ ) y  $RFA$  se puede utilizar el método de integración de Gauss (Goudriaan 1986; 2000 com. personal).

La medida de la actividad fotosintética de la planta completa se llevó a cabo utilizando tres metodologías:

A) Se estimó el área foliar total de seis plantas, según el método de Arcila (1987) y se calculó el índice de área foliar ( $IAF$ ) siguiendo la relación:

$$IAF = \frac{AreaFoliar}{Areadel suelo}$$

Se midió el intercambio gaseoso en dos plantas escogidas al azar, en las cámaras diseñadas para tal fin. Éste se midió durante 24 h día<sup>-1</sup>, cada dos minutos, en períodos de 3, 4, 6 y 7 días para un total de 20 días de medición, en un lapso de tres meses.

B) Se midió la fotosíntesis de hojas individuales según Goudriaan (1986), utilizando el método de integración de Gauss para tres profundidades en el dosel y para tres horas del día.

Con las mediciones de hojas individuales en las diferentes profundidades y horas del día calculadas, se integraron las curvas correspondientes a dos grupos de datos. El primero comprende las mediciones en las horas calculadas de acuerdo con Goudriaan (1986) 07:00, 12:00 y 17:00 horas y el segundo para las 07:00 - 09:00 - 13:00 - 15:00 y 17:00 horas. La introducción de dos horas de medición adicionales aumenta la probabilidad de un mejor ajuste si se tiene en cuenta que la fotosíntesis en hojas individuales sigue una tendencia bimodal (Nutman 1937; Riaño 1991; López *et al.* 1999).

La actividad fotosintética se midió en las hojas donde coincidía el  $IAF$  acumulado de cuatro plantas, cada dos

horas entre las 07:00 y 17:00, haciendo coincidir las horas, con los instantes calculados según la metodología descrita arriba. Las mediciones se realizaron con un equipo portátil de fotosíntesis ADC - LCA4 (*Analytical Development Co. England*) calibrado con aire sintético [ $503 \mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{mol}^{-1}(\text{aire})$ ] y con vapor de agua (1.15 kPa) generado con un equipo ADC-WG-601. Las mediciones se realizaron paralelamente con las plantas completas en confinamiento.

C) Mediante la adaptación del modelo de simulación de la fotosíntesis desarrollado por Goudriaan (1986) efectuada por Quiroga *et al.* (1999) para el café. Los datos utilizados fueron la latitud del sitio del experimento, fecha de transplante, genotipo, densidad de población, temperatura media diaria calculada (°C) y el brillo solar diario (horas) del período entre la fecha de transplante en el campo y la última medición.

## Manejo de la información y análisis estadístico

Para la primera metodología, se generaron las curvas de intercambio gaseoso para cada día de medición, se hallaron las áreas bajo las curvas mediante la subrutina AREA.XFM de SigmaPlot 5.0 (*SPSS, Inc.*). También se obtuvo el modelo de mejor ajuste para la tasa diaria de asimilación de  $\text{CO}_2$  en la planta completa. La integración de los resultados se llevó a cabo utilizando el programa SAS (*SAS, Inc.*).

Para la segunda metodología, se generaron las curvas de intercambio gaseoso diario para cada hoja individual y se obtuvo el área bajo la curva en la forma descrita arriba. Para calcular la fotosíntesis de la planta completa a partir de la metodología propuesta por Goudriaan (1986), se estimaron los valores de fotosíntesis máxima ( $F_m$ ), respiración en la oscuridad ( $R_d$ ) y eficiencia en el uso de la energía luminosa ( $e$ ), con base en la relación  $RFA$  y asimilación neta de  $\text{CO}_2$  para todo el follaje de la planta ( $A_{pl}$ ), ajustado a un modelo exponencial asintótico.

Las asimilaciones netas de  $\text{CO}_2$  [ $A_{pl}$  - Kg ( $\text{CO}_2$ ) ha<sup>-1</sup> (hoja día<sup>-1</sup>)] de las plantas completas en confinamiento y las calculadas por los otros métodos, se compararon mediante análisis de varianza y prueba de Tukey<sub>(0.05)</sub>.

## Resultados y discusión

### Comportamiento de la temperatura del aire (Interna $T_i$ - Externa $T$ )

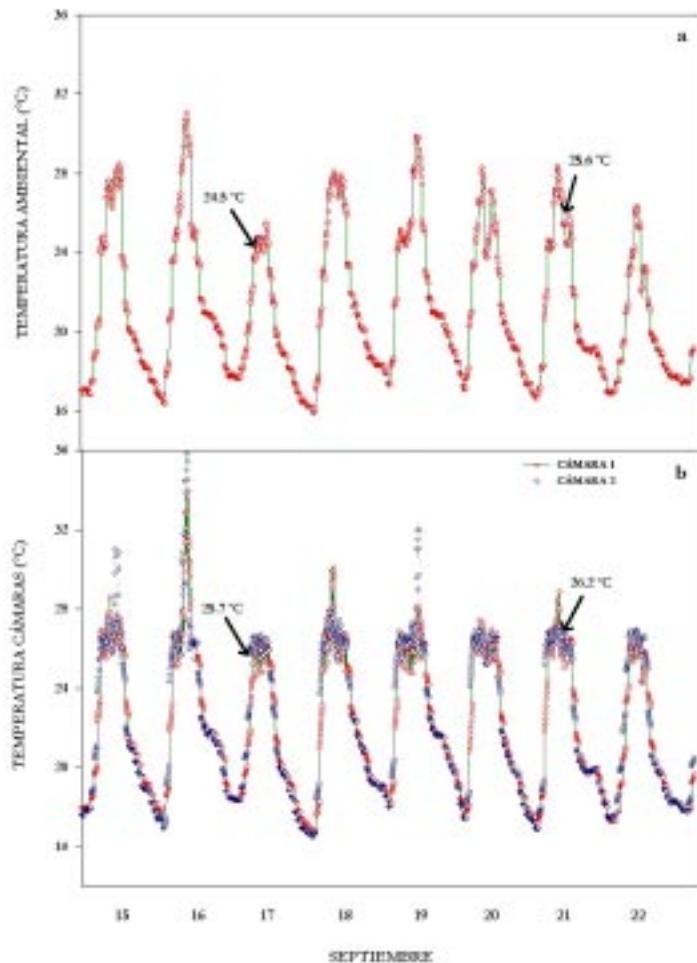
El mayor calentamiento del aire al interior de las cámaras se debe al efecto invernadero que se genera por

las reflexiones sucesivas de la radiación, y por la disipación de la energía en radiaciones de longitud de onda del infrarrojo que son absorbidas por el  $\text{CO}_2$  y el vapor de agua, lo que se traduce en incrementos de temperatura. A pesar de las diferencias encontradas,  $T_i$  se encuentra dentro de los rangos permisibles de  $T$  para el crecimiento y desarrollo adecuado de la planta, con valores de temperatura promedios para el día de 24.3 y 24.5 °C para las cámaras 1 y 2 respectivamente, lo cual concuerda con los datos reportados por muchos autores para especies con metabolismo fotosintético  $\text{C}_3$ . La  $T_i$  para todas las mediciones realizadas, independiente de la cámara utilizada es estadísticamente superior a la  $T_e$  de acuerdo con la prueba de  $t_{(0.05)}$  (Figuras 1a y 1b).

### Comportamiento de la Humedad Relativa Externa ( $HR_e$ ) e Interna ( $HR_i$ )

Los resultados muestran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para la  $HR_i$  entre cámaras, y entre  $HR_e$  y  $HR_i$ . La humedad relativa en el interior de las cámaras fue superior a la ambiental durante el día en un promedio de 12.7% y en la noche entre 5 y 10% (Figura 2a). A pesar de los valores superiores en el interior de las cámaras (Figura 2b), se aprecia que la oscilación diurna y nocturna fue similar en las dos condiciones.

Utilizando la información colectada en 20 días de medición, se calculó  $A_{pl}$  mediante la rutina AREA.XFM de SigmaPlot 5.0 (SPSS, Inc.) para intervalos de tiempo



**Figura 1.** (a) Temperatura ambiental ( $T_e$ ) y (b) Temperatura cámaras ( $T_i$ ) entre el 15 y 22 de septiembre de 1999.

desiguales. Los resultados indican que  $A_{pl}$  es mayor en los días con  $RFA$ ,  $T_a$  moderadas y  $HR$  altas (figura 3). El modelo de mejor ajuste para describir la tasa de asimilación por el dosel ( $A_{pl}$ ), a través del tiempo efectivo de asimilación durante el día, es de la forma,

$$y = a + Ex + Fx^2$$

Donde:  $x$  = Tiempo medido en fracción de hora

$$y = A_{pl} [Kg (CO_2) ha^{-1}(hoja) día^{-1}]$$

En todos los días estudiados, tanto el modelo como los parámetros son altamente significativos ( $p < 0.0001$ ).

El área bajo la curva para los modelos de tipo cuadrático, se calculó mediante la ecuación

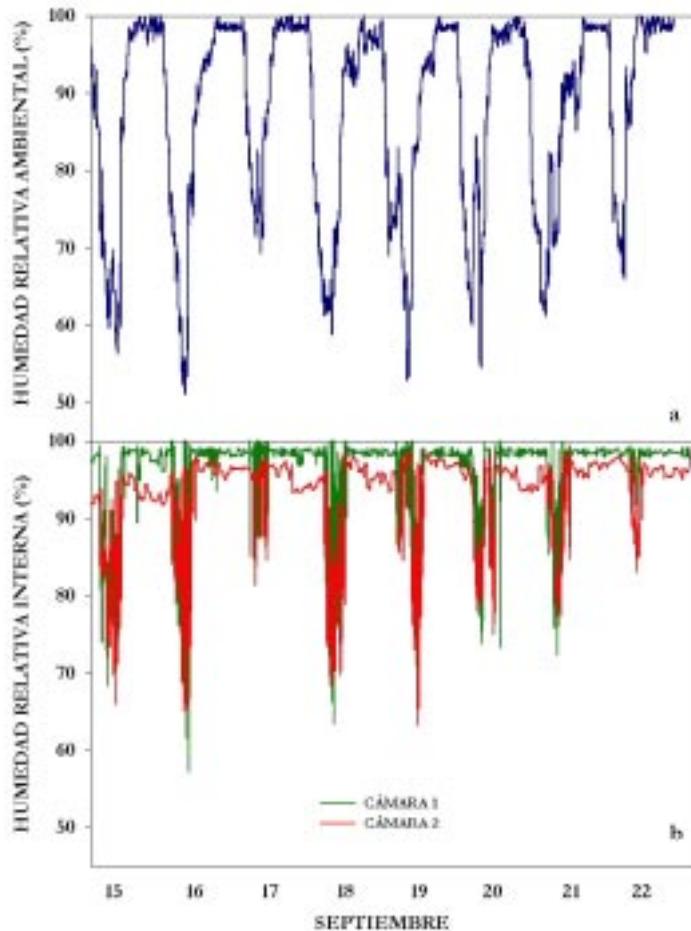
$$\int_{ti}^{tf} a + bx + cx^2 = [(a * tf) - (a * ti)] + \left[ \left( \frac{b * tf^2}{2} \right) - \left( \frac{b * ti^2}{2} \right) \right] + \left[ \left( \frac{c * tf^3}{3} \right) - \left( \frac{c * ti^3}{3} \right) \right]$$

Donde:  $ti$  = Tiempo inicial

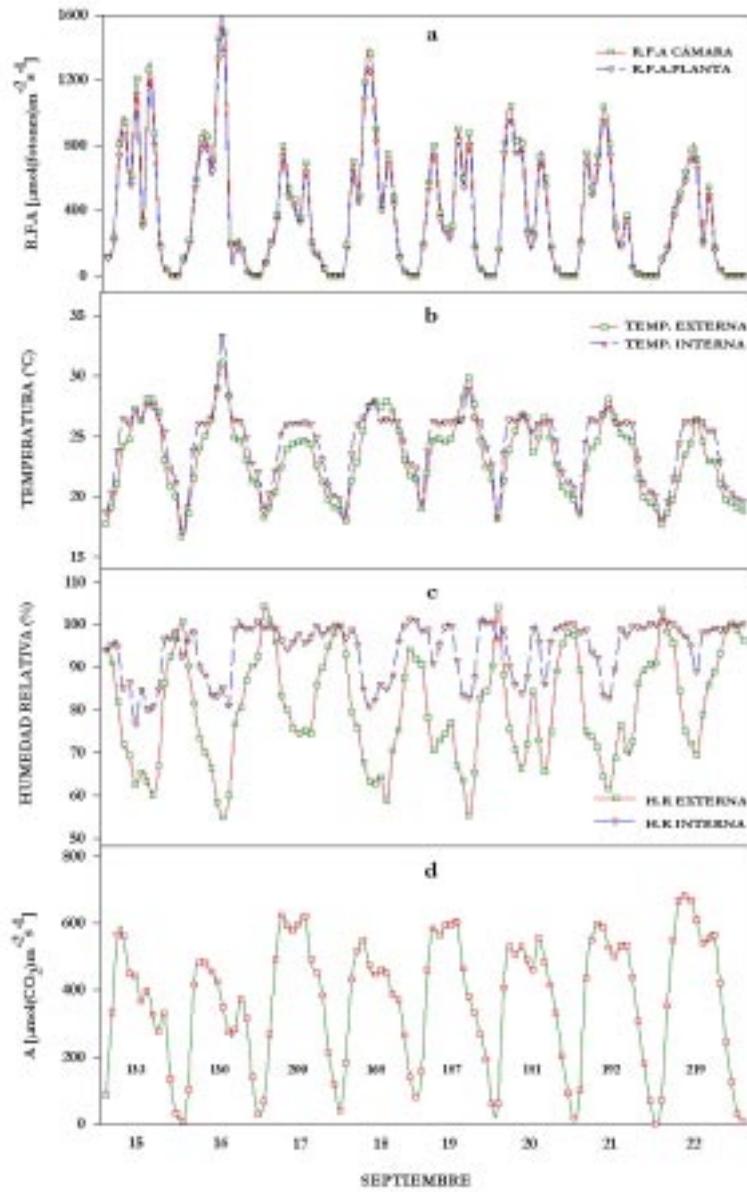
$tf$  = Tiempo final

$a$ ,  $b$  y  $c$  = Parámetros de la ecuación

Los valores de asimilación diaria de  $CO_2$  por la planta completa obtenidos mediante este método son estadísticamente iguales a los calculados por el método de los trapecios (AREA.XFM) lo que indica que



**Figura 2.** (a) Humedad relativa ambiental ( $H_a$ ) y (b) Humedad relativa cámaras ( $H_i$ ) entre el 15 y 22 de septiembre de 1999



**Figura 3.** Comportamiento de: (a) *RFA*, (b) Temperatura, (c) Humedad relativa, durante 8 días de medición y (d) Asimilación diaria de CO<sub>2</sub> de la planta completa bajo condiciones semicontroladas (números bajo los picos corresponden al valor de asimilación en Kg(CO<sub>2</sub>)ha<sup>-1</sup>(hoja) día<sup>-1</sup>).

cualquiera de las dos metodologías es confiable para obtener  $A_{pl}$ . El promedio para 20 días de medición es de  $183.9 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1} \pm 27.7 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1}$  y un coeficiente de variación (CV) del 15%. La magnitud del CV se debe a los cambios en la oferta ambiental diaria, normal en el sitio donde se realizó el estudio.

### $A_{pl}$ diaria calculada siguiendo el método de Goudriaan (1986)

La relación entre la fotosíntesis y la radiación puede ser descrita por una función exponencial asintótica, similar a la encontrada en hojas individuales, de la forma:

$$Y = Y_0 + a[1 - e^{-bx}]$$

donde:  $Y_0 = 25.55 \text{ mg}_{(\text{CO}_2)} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $p < 0.0001$ )

$a = 539.44 \text{ mg}_{(\text{CO}_2)} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ( $p < 0.0001$ )

$b = 0.0084$  ( $p < 0.0001$ )

$r^2 = 0.803$

$Y = A [\mu\text{g}_{(\text{CO}_2)} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$

$x = RFA [\mu\text{mol}_{(\text{fotones})} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}]$

La eficiencia fotosintética ( $e$ ) se calculó utilizando los parámetros obtenidos e igualando la función calculada con la función propuesta por Goudriaan (1986).

$$Y_0 + a[1 - e^{-bx}] = (Fm + Rd) \left( 1 - e^{\left( \frac{-Hx}{(Fm + Rd)} \right)} \right) - Rd$$

donde:  $Y_0 = \text{Respiración oscura } (Rd)$

$a = \text{Fotosíntesis máxima } (Fm)$

$x = \text{Radiación incidente en el tope del dosel } (H)$

El valor de  $e$  es de  $19.97 \mu\text{g}(\text{CO}_2) \text{ J}^{-1}$  y el punto de compensación de luz ( $G_{\text{luz}}$ ) es de  $5.8 \mu\text{mol}(\text{fotones}) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Para obtener  $A_{pl}$  utilizando esta metodología, se emplearon el  $IAF$ , el coeficiente de extinción de la radiación a través del dosel del café ( $k$ ) obtenido por Castillo *et al* (1997), la duración del día extraterrestre en horas ( $D$ ) y los valores de  $RFA$  incidente ( $I_o$ ) ( $\text{Wm}^{-2}$ ) en la parte superior del dosel de la planta. El valor promedio encontrado fue de  $160.6 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1} \pm 24.5 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1}$  y un CV del 15%.

### $A_{pl}$ estimada a partir de la medición de $A$ en hojas individuales

El valor promedio de  $A_{pl}$  para las tres horas de integración [ $120.3 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1} \pm 56.6 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1}$  y un CV del 47%] es significativamente inferior al obtenido para las cinco horas [ $174.2 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1} \pm 54.8 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1}$  y un CV del 31%]. Los altos coeficientes de variación se deben probablemente a la diferencia de edad y posición de las hojas medidas al interior de cada estrato en las cuatro plantas utilizadas y al mutuo sombrío de las hojas en el dosel.

### $A_{pl}$ calculado según la adaptación del modelo de Goudriaan (1986) efectuada por Quiroga et al (1999) para el café.

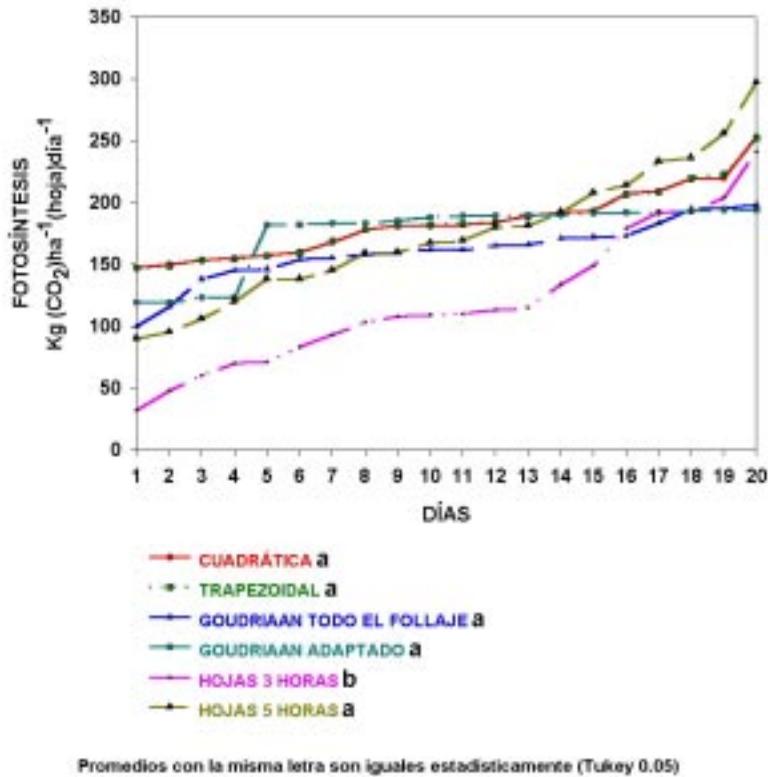
La asimilación promedio de  $\text{CO}_2$  ( $A_{pl}$ ) calculada por el modelo para el café fue de  $175.1 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1} \pm 28 \text{ kg}(\text{CO}_2) \text{ ha}^{-1}(\text{hoja}) \text{ día}^{-1}$  con un cv de 16%.

### Comparación de $A_{pl}$ medida y calculada por cada uno de los métodos de integración

Los valores de asimilación en la planta completa ( $A_{pl}$ ) obtenidos con los diferentes métodos se compararon estadísticamente teniendo como fuentes de variación la metodología, el ciclo de medición y la interacción método x ciclo. El análisis arrojó diferencias altamente significativas ( $p < 0.01$ ) entre métodos. No se encontraron diferencias estadísticas entre ciclos ni en las interacciones método x ciclo. Según la prueba de Tukey<sub>(0.05)</sub>, la  $A_{pl}$  obtenida a partir de hojas individuales en las tres horas calculadas (Goudriaan, 1986), es la única que presenta diferencias significativas con las encontradas siguiendo las otras metodologías, (Figura 4).

### Balance neto diario de carbono en la planta completa de café

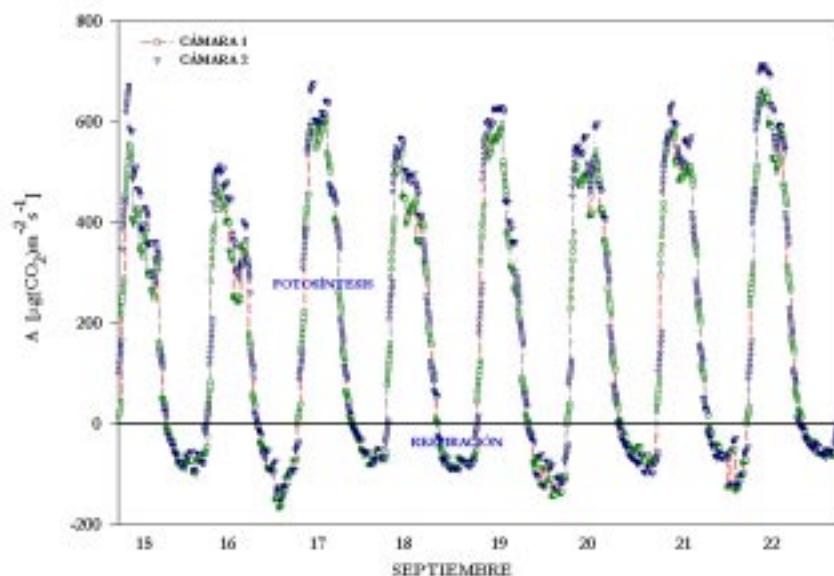
El sistema de medición de intercambio gaseoso en plantas completas permite su monitoreo y registro durante las 24 horas del día, lo cual incluye la medición de la respiración en la noche. La información permite obtener un balance neto diario de ganancia de carbono. En la Tabla 1 y Figura 5 se presenta la información obtenida para el tercer ciclo de mediciones.



**Figura 4.** Asimilación de  $\text{CO}_2$  de plantas completas  $A_{pl}$  [ $\text{Kg}(\text{CO}_2)\text{ha}^{-1}(\text{hoja})\text{día}^{-1}$ ] observados y estimados por diferentes métodos

**Tabla 1.** Balance neto diario de carbono en el café. Asimilación neta de  $\text{CO}_2$  ( $A_{pl}$ ) y Respiración en la oscuridad ( $Rd_{pl}$ ) en [ $\text{Kg}(\text{CO}_2)\text{ha}^{-1}(\text{hoja})\text{día}^{-1}$ ].

| CICLO | MES | DÍA         | $A_{pl}$<br>$\text{Kg}(\text{CO}_2)\text{ha}^{-1}\text{día}^{-1}$ | $Rd_{pl}$<br>$\text{Kg}(\text{CO}_2)\text{ha}^{-1}\text{día}^{-1}$ | Ganancia neta diaria<br>$\text{Kg}(\text{CO}_2)\text{ha}^{-1}\text{día}^{-1}$ | Relación $A_{pl} / Rd_{pl}$ |
|-------|-----|-------------|---|--|---|-----------------------------|
| 3     | 9   | 15          | 153   | 24   | 130   | 6.4                         |
| 3     | 9   | 16          | 150   | 33   | 117   | 4.5                         |
| 3     | 9   | 17          | 200   | 16   | 184   | 12.5                        |
| 3     | 9   | 18          | 168   | 25   | 143   | 6.7                         |
| 3     | 9   | 19          | 187   | 33   | 154   | 5.7                         |
| 3     | 9   | 20          | 181   | 20   | 161   | 9.0                         |
| 3     | 9   | 21          | 192   | 25   | 167   | 7.7                         |
| 3     | 9   | 22          | 219   | 14   | 205   | 15.6                        |
|       |     | <b>PROM</b> | <b>181</b>  | <b>24</b>  | <b>157</b>  | <b>8.5</b>                  |



**Figura 5.** Fotosíntesis y Respiración en plantas completas de café, para los días comprendidos entre el 15 y 22 de septiembre de 1999.

Si bien la asimilación neta de  $\text{CO}_2$  está determinada, en parte, por el comportamiento de las variables exógenas ( $RFA$ ,  $T$  y  $HR$  principalmente), la respiración nocturna depende en gran medida de  $T$  y la cantidad de asimilados que pueden ser movilizados según la dinámica y el tamaño del vertedero (Larcher, 1977). En general, se observa que para tener un alto balance neto de carbono, no es garantía tener altas tasas de asimilación diaria, pues la utilización de esos asimilados dependerá de la temperatura nocturna y del tamaño de los sitios de utilización o de la velocidad en las zonas de crecimiento y diferenciación celular. Así, para algunos días que presentaron tasas altas de asimilación, la respiración nocturna, como medida de utilización de asimilados, es baja, mientras que para otros días se observa lo contrario. Cuando se calculó la relación  $A_{pl}/R_{dpl}$ , el valor promedio obtenido está dentro de los rangos reportados por Thomas y Hill (1949) para alfalfa.

## Discusión

Si bien se presentaron diferencias estadísticas entre las condiciones ambientales externas y el sistema de intercambio gaseoso, excepto para la temperatura interna entre las dos cámaras, el diseño y construcción del sistema de fotosíntesis para plantas completas cumplió en forma satisfactoria con los requerimientos exigidos,

de tal forma que se mantienen las condiciones ambientales internas muy cercanas a las externas ( $T_i$  y  $HR_i$ ). Por lo tanto, el comportamiento del intercambio gaseoso de café *Coffea arabica* L., bajo las condiciones experimentales de confinamiento, es similar al encontrado para otras especies (Reifsnnyder y Questa, 1994; Phene *et al.*, 1978).

Los valores de  $A_{pl}$  registrados a partir de hojas individuales cuando se adicionaron dos horas de medición (09:00 y 15:00) y los encontrados siguiendo la adaptación de Quiroga *et al.* (1999) del modelo de Goudriaan (1986), se ajustan con alto nivel de confiabilidad a los datos encontrados en condiciones semicontroladas. La falta de ajuste entre la fotosíntesis calculada por el modelo y la observada cuando se utilizan sólo tres horas de medición en hojas individuales se debe a que la curva de respuesta fotosintética es bimodal, similar a la encontrada por (Nutman 1937; Riaño 1991; López *et al.* 1999) y no parabólica como encontró Goudriaan (1982) para tres profundidades y tres instantes del día en varias especies cultivadas en la zona templada, donde los valores de  $A_{pl}$  se ajustan estrechamente a los valores reales. Los resultados del comportamiento de la fotosíntesis diaria tanto en hojas individuales como en el dosel encontrados en este estudio, confirman los datos de la literatura consultada. Se ha observado que en las

hojas auto sombreadas el patrón de comportamiento es unimodal (Nutman 1937; Riaño 1991; López *et al.* 1999), sin embargo, en la etapa del crecimiento de las plantas utilizadas en este trabajo, la mayor parte de las hojas se encontraban directamente expuestas a la radiación.

Los resultados obtenidos en 20 días de medición durante un lapso de tres meses, con oferta ambiental diferente, muestran una variabilidad de  $A_{pl}$  menor del 16.0%, lo cual indica que en el cafeto (especie perenne), hasta 400 días después de la siembra, no se presentan cambios significativos en la asimilación de  $CO_2$ ; es decir, la curva de crecimiento del área foliar aún se encuentra en la fase lenta con cambios mínimos de velocidad (Riaño *et al.* 2000). La magnitud del coeficiente de variación para hojas individuales puede ser explicada por las diferencias en edad y posición de las hojas de un mismo estrato. Por esta razón, cuando se va a estimar  $A_{pl}$  a partir de hojas individuales, es recomendable escoger una hoja representativa por edad y posición en el estrato correspondiente al IAF acumulado.

De acuerdo con los resultados se puede establecer que el modelo que describe el comportamiento fotosintético de la planta de café desarrollado por Quiroga *et al.* (1999), a partir del modelo de Goudriaan (1986), estima la fotosíntesis de la planta completa con un alto nivel de ajuste a los valores reales, aún cuando se asume un comportamiento de  $A_{pl}$  bimodal. Esto justifica que el modelo adaptado forme parte de una subrutina del modelo general del crecimiento y productividad del cultivo ya que la producción inicial de asimilados fotosintéticos es la base de los procesos de acumulación y distribución de la materia seca (Long y Hallgren 1987). Así mismo el trabajo contribuye con los cálculos del potencial de captura de  $CO_2$  por el cultivo del cafeto en Colombia y, a través del sistema de intercambio gaseoso, a la futura validación de modelos de fotosíntesis que calculen la captura de  $CO_2$  por especies forestales y otras de interés para la zona cafetera colombiana.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Especialmente al Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé y su equipo de trabajo en Fisiología vegetal. Al Instituto Colombiano para el desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” - COLCIENCIAS por la cofinanciación del proyecto 2251-07-002-93 que permitió la adquisición de los equipos con los que se desarrolló la presente investigación.

## Bibliografía

- Acock, B. 1991. Modeling canopy photosynthetic response to carbon dioxide, light interception, temperature and leaf traits. *In: Boote KJ and Loomis RS Eds. Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy*, pp 41-56. Madison: CCSA, (CSSA Special Publication N° 19)
- Allen, L.H.; Lemon, E.R. 1976. Carbon dioxide exchange and turbulence in a Costa Rican tropical rain forest. *In: Monteith, J.L. Ed. Vegetation and the atmosphere*. New York: Academic Press, p. 265-308.
- Amthor, J.S. 1994. Scaling  $CO_2$  photosynthesis relationships from the leaf to the canopy. *Photosynthesis Research*. 39: 321-350.
- Anten, N.P.R. 1997. Modelling canopy photosynthesis using parameters determined from simple non destructive measurements. *Ecological Research*. 12: 77-88.
- Arcila P.J. 1987. Métodos prácticos para medición del área foliar del cafeto. Diseño de una reglilla para medición del área foliar en el campo. *In: Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenciafé. Chinchiná, Colombia. Informe anual de labores Disciplina Fisiología Vegetal. 1986 - 1987.*
- Boote, K.J.; Loomis, R.S. 1991. The prediction of canopy assimilation. *In: Boote, K Loomis, R Eds. Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy*. Madison, Estados Unidos: CSSA, p. 109-140. (CSSA Special Publication N° 19).
- Buwalda, J.G.; Meekings, J.S. 1992. Parameter estimation and validation of a canopy photosynthesis model for Kiwifruit vines. *Acta Horticulturae*. 313: 29-36.
- Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé. 1999. Anuario Meteorológico Cafetero, 1998. Chinchiná (Colombia), 515 p.
- Collatz, G.T.; Ball, T.J.; Griuret, C.; Berry, J.A. 1991. Physiological environment regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: A model including a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*. 54: 107-136.
- Gómez, L. F.; Riaño, N. 2001. Diseño, construcción y evaluación de un sistema de intercambio gaseoso para plantas completas. Cenicafé, 2001. *In Press*.
- Goudriaan, J. 1982. Crop production and plant growth in optimal conditions. Potential production processes. *In: Penning de V. F.W.T., Laar, H.V. Eds. Simulation of plant growth and crop production*. Wageningen, Nederland. Centre for agricultural publishing and documentation, p 308.

- Goudriaan, J. 1986. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*. 38: 249-254.
- Keulen, H. VAN.; Penning de V., F.W.T.; Drees, E.M. 1982. A summary model for crop growth. *In: Penning de V., F.W.T., Laar, H.V. Eds. Simulation of plant growth and crop production*. Wageningen, Nederland. Centre for agricultural publishing and documentation, p 87.
- Lakso, A.N. 1992. The simplified dry matter production model for apple: Estimation of canopy photosynthesis in discontinuous canopies. *Acta Horticulturae*. 313: 45-52.
- Larcher, W. 1977. *Ecofisiología Vegetal*. (Lalucat, J. Trad.). Barcelona, España: Ediciones Omega, S.A. p. 23-152.
- Long, S.P.; Hallgren, J.E. 1987. Measurement of CO<sub>2</sub> assimilation by plants in the field and the laboratory. *In: Coombs, J.; Hall, D.O.; Long, S.P.; Scurlock, J.M.O. Eds. Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. 2<sup>nd</sup> edition. Pergamon Press. p. 62-94.
- López, J.C.; Riaño, N.; López, Y. 1999. Comportamiento fotosintético diario de la hoja del cafeto *Coffea arabica* L. cv. Colombia. Chinchiná (Colombia): Cenicafé. 12 p.
- Nutman, F.J. 1937. Bearing of recent physiological research on the shade problem of arabica coffee cultivation. *East African Agricultural and Forestry Journal*. 2: 366-370.
- Phene, C.J.; Baker, D.N.; Lambert, J.E.; Parsons, J.E.; Mckinion, J.M. 1978. SPAR. A Soil - Plant - Atmosphere Research System. *Transactions of the ASAE*. 21: 924-930.
- Quiroga, F.; Orozco, L.; Arcila, J.; Riaño, N.; Jaramillo, A.; Montoya, E. 1999. Simulación matemática de la producción potencial del cultivo del café. *In: Jornada Nacional en Biomatemática*, 2. Armenia (Colombia), Mayo 3-15.
- Reynolds, J. F.; Chen, J.L; Harley, P.C.; Hilbert, D.W.; Dougherty, R.L.; Tenhunen, J.D. 1992. Modeling the effects of elevated CO<sub>2</sub> on plants: Extrapolating leaf response to a canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*. 61: 69-94.
- Reifnyder, W.E.; Questa, N.M. 1994. The free-air carbon dioxide enrichment (FACE) cotton project: A new field approach to assess the biological consequences of global change. *Agricultural and Forest Meteorology*. 70: 1-34.
- Riaño, N. 1991. Productividad del cafeto. Variabilidad genotípica de la actividad fotosintética. *In: Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé*. Chinchiná (Colombia). Informe anual de labores Disciplina Fisiología Vegetal. 1990-1991. p. 55-58.
- Riaño, N.; Arcila, J.; Jaramillo, A.; Chaves, B. 2000. Acumulación de materia seca y extracción de nutrimentos por *Coffea arabica* L. cv. Colombia en tres localidades de la zona cafetera colombiana. *In: Simposio de los suelos de la zona cafetera colombiana – hacia el siglo XXI*. (Julio 24-28, Chinchiná, Colombia). Memorias del Simposio.
- Ritchie, J.T. 1995. Agricultural systems applications through an international consortium ICASA. *Agricultural Systems*. 49: 329-335.
- Spitters, C.J.T. 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II: Calculation of canopy photosynthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*. 38: 231-242.
- Wit, C.T. de. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Wageningen, Nederland. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. 57 p.
- Wit, C.T. de. 1978. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops. Wageningen, Nederland. Centre for Agricultural Publishing and Documentation. 141 p.

