

## Captura y flujo de carbono en un sistema silvopastoril de la zona Andina Colombiana<sup>1</sup>

A. Giraldo<sup>2</sup>, M. Zapata, y E. Montoya

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Departamento de Producción Animal,  
Grupo de Investigación Biotecnología Ruminal y Silvopastoreo.  
Recibido Diciembre 20, 2007. Aceptado Julio 7, 2008.

---

### Carbon capture and flow in a sylvopastoral system of the Colombian Andean zone

**ABSTRACT.** A protocol was developed to measure carbon capture and monitor the flow of C as an environmental service provided by a sylvopastoral system (SSP) of *Acacia decurrens* + *Pennisetum clandestinum* in the Colombian Andes (2538 m latitude), employing two densities of sowing of trees: high (HD) and low (LD) (1111 and 407 trees/ha) and as the control treatment, areas of pasture only devoid of trees. In addition, the carbon flow between grazing Holstein cows and the soil was evaluated by measuring feces production resulting from consumption of the biomass system. Six years after establishment of the SSP, the total amount of C in trees, pasture plants and soil was estimated at 260 and 251 t/ha for HD and LD, respectively, as compared to 154t/ha for the control. The animal flow of C through animal feces was estimated as 0.50, 0.47, and 0.48 t per standard cow unit (600 kg liveweight) for HD, LD and control, respectively. Averaged across two years, the respective annual increases of C in the aerial part of the trees were 9.9 and 11.2 tC for HD and LD.

**Key words:** Carbon capture, Colombia, Grazing, Sylvopastoral system

---

**RESUMEN.** Se desarrolló un protocolo para medir la captura de carbono y monitorear el flujo de C como servicio ambiental aportado por un sistema silvopastoril (SSP) de *Acacia decurrens* + *Pennisetum clandestinum* ubicado en los Andes colombianos (2538 msnm) a dos densidades de siembra: alta (AD) y baja (BD) (1111 y 407 árboles/ha) y como testigo, áreas de pasto únicamente, desprovistas de árboles. Además, se estudió el flujo de carbono entre vacas de raza Holstein en pastoreo y el suelo al medir la producción de heces fecales resultante del consumo de la biomasa del sistema. A los seis años de establecido el SSP, la cantidad total de C existente en árboles, plantas forrajeras y suelo se estimó en 260 y 251 t/ha para AD y BD, respectivamente, comparado con 154 t/ha para el testigo. El flujo anual de C a través de las heces fecales se estimó en 0.50, 0.47 y 0.48 t por unidad estándar de animal (600 kg de peso vivo) para AD, BD y testigo, respectivamente. En los datos combinados de dos años, los respectivos incrementos medios anuales de carbono en la parte aérea de los árboles fueron de 9.9 y 11.2 t/ha en los SSP de AD y BD.

**Palabras clave:** Captura de carbono, Colombia, Pastoreo, Sistema silvopastoril.

---

<sup>1</sup>Agradecimientos. Universidad Nacional de Colombia, Vicerrectoría Académica (DINAIN) por la financiación. A COLCIENCIAS por su apoyo con el programa Jóvenes Investigadores.

<sup>2</sup>Autor para la correspondencia, e-mail: conisilvo@une.net.com

## Introducción

De la población total bovina que se presenta en Colombia, el 11% está orientada a la lechería especializada (Fedegan, 2006) y, una importante parte de ésta, a explotaciones del tipo pastoril y silvopastoril que se ubican en la zona andina y a altitudes superiores a los 1880 msnm (Holmann *et al.*, 2003). El uso y la adaptación de prácticas agroforestales en la crianza de animales en pastoreo ha mostrado ser útil tanto para aumentar la producción pecuaria como para brindar servicios, como la fijación de carbono en los suelos y la vegetación,

incrementar la biodiversidad y ayudar a conservar las fuentes de agua (Giraldo, 2000). Bajo dicho contexto, se planeó un estudio tendiente a evaluar el servicio ambiental de captura de carbono y el flujo de su retorno al suelo, concernientes al aporte de C de las heces de bovinos pastoreados, en áreas de un sistema silvopastoril (SSP) y bajo dos diferentes densidades contrastantes de siembra de árboles de acacia negra (*Acacia decurrens*) más pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*), como cultivo de cobertura y de pastoreo.

## Materiales y Métodos

El trabajo se efectuó en el Departamento de Antioquia, en el co-regimiento de Santa Elena, al oriente de la ciudad de Medellín, en la finca Paysandú a 2538 msnm, con una temperatura media de 14°C, una precipitación de 2200 mm anuales y con suelos andisoles de mediana fertilidad y de alta acumulación de materia orgánica.

A fin de evaluar los efectos sobre el servicio ambiental y flujo de C debidos a la ausencia y densidades de árboles se adoptó el criterio de designar al nivel de 1111 árboles/ha como alta densidad (AD); 407 árboles/ha como baja densidad (BD) y sin árboles (TC), como la línea base en el esquema del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) dentro del protocolo de Kyoto. La C se estimó en: 1) La biomasa aérea (árboles y pasturas), seis años después de la plantación, cuando tuvieron en promedio 18 m de alto; 2) La biomasa radical (de árboles y pasturas asociadas); 3) El C en el suelo en formas húmicas y 4) El C presente en las heces, producto del consumo por bovinos. Se utilizaron nueve vacas adultas Holstein en lactancia ( $600 \pm 18$  kg PV). Éstas pastorearon de manera secuencial a través de las áreas correspondiente a los tratamientos, mediante un pastoreo rotacional de 3/45 d de pastoreo/ descanso; en siete ciclos y con una carga de 3 animales/ha, colectándose muestras de heces del recto (140 g), por tres días consecutivos, en la mañana, durante los ciclos de pastoreo.

En cada área experimental (tratamientos) se seleccionaron parcelas fijas de evaluación de 500

m<sup>2</sup>, según lo descrito por Winrock (MacDicken, 1997) y procedimientos de Orrego *et al.* (2000). Se midió el perímetro del fuste y la altura de los árboles dentro de cada parcela, mediante el uso de microdendrómetro e hipsómetro mecánico.

Para el cálculo de la biomasa aérea de árboles y sus raíces, se emplearon ecuaciones alométricas (cosechando ocho árboles por fuera de las parcelas teniendo en cuenta su arquitectura). Los árboles se apearon haciendo un corte a ras del suelo y midiendo su longitud. Muestras del tronco, ramas y hojas (500 g) se secaron al horno (80°C) hasta peso constante. La extracción de raíces de los árboles, se hizo rastreándolas hasta un diámetro mínimo de 5 mm manualmente de cada árbol, limpiándolas y pesándolas en el campo.

Para el muestreo de raíces en las pasturas se usó un barreno de golpe "Root Auger Eijkelkamp" obteniendo cilindros de suelo de 15 cm de longitud y 8 de diámetro, tomados en cinco puntos aleatoriamente hasta una profundidad de 30 cm. La biomasa aérea se muestreó del forraje disponible sobre los puntos de muestreo de raíces.

Se tomaron muestras de suelo en 20 puntos/parcela al azar, utilizando un barreno y sacabocado hasta 90 cm de profundidad con seis estratos: 0-15; 15-30; 30-45; 45-60; 60-75; y 75-90 cm. Para calcular las existencias de carbono edáfico (C t ha<sup>-1</sup>), se utilizó la fórmula:

$$C = a * \delta(t/m^{-3}) * Pm * fc \quad (1)$$

Donde: *a* es el área (ha),  $\delta$  es la densidad aparente del suelo en (t/m<sup>3</sup>), *Pm* es la

profundidad de muestreo ( $m$ ) y  $fc$  es la fracción de carbono (%C/100) a cada profundidad. La cantidad de carbono almacenado en los tejidos vegetales se supuso igual a 50% de la materia seca (Brown, 1997).

Para cuantificar la cantidad de heces producidas, se utilizó como marcador interno la fibra ácido detergente indigerible (FDAi) (Cochran *et al.*, 1988) y los procedimientos de Lascano (1990). Para determinar la FDAi del forraje se tomaron manualmente cinco muestras al azar por medio de la técnica

“Hand Pluck”, (Euclides *et al.*, 1962), las que se incubaron en el rumen por 144 h en dos vacas Holstein adultas provistas de cánulas ruminales, utilizando la técnica de la bolsa de nylon (Ørskov *et al.*, 1980). Los análisis de FDA se realizaron en un digestor Ankom 2000®, (Van Soest, 1982), tanto antes como después de ser incubadas en el rumen, igualmente en las heces, suponiendo que en la materia vegetal (materia orgánica) el 50% es carbono una vez se extrae el agua (MacDicken, 1997).

## Resultados y Discusión

El modelo alométrico lineal encontrado para *Acacia decurrens*, utilizando el diámetro del fuste como variable explicativa, y derivado a partir de su respectivo modelo ajustado fue:

$$\ln(Bt) = -1.5136 + 2.2416 \ln(D); R^2 = 0.97. \quad (2)$$

$$\text{Ajustado: } Bt = 0.2201D^{2.24} \quad (3)$$

Donde:  $Bt$  es la biomasa aérea calculada en kg y  $D$  es el registro del diámetro medido a cada árbol en cm. Con este modelo se estimó la biomasa aérea de los árboles considerando únicamente su diámetro.

En cuanto a los tratamientos de densidad de siembra, se comprobó mayores existencias totales de C en la biomasa aérea, basa en el árbol, con las siembras de BD, que de AD (Cuadro 1). El C total fijado por hectárea resultó ser dos veces más en la menor densidad de siembra de árboles (BD) respecto al testigo.

El modelo encontrado para las raíces de *A. decurrens* usando el diámetro del fuste como variable explicativa fue:

$$\ln(BR) = -2.902 + 2.205 \ln(D); R^2 = 0.98. \quad (4)$$

Donde:  $BR$  es la biomasa radical total calculada en kg y  $D$  es el registro del diámetro medido a cada árbol en cm. Con este modelo se estimó la biomasa radical de los árboles hasta 5 mm de diámetro de cada árbol de cada parcela y tratamiento.

El C promedio fijado tanto en las raíces como por la biomasa aérea de la pastura se vio afectado con la mayor presencia de árboles. Las diferencias en fijación de C entre las raíces de los árboles de *A. decurrens* y el pasto *P. clandestinum*, con y sin árboles, son en gran medida debidas a los efectos de la presencia y densidad de siembra de los árboles y reflejan diferencias impuestas por la competencia por

Cuadro 1. Biomasa aérea y radical (t/ha) y correspondiente promedio de C fijado (kg) por árbol de *Acacia decurrens* en tres repeticiones de siembras de alta (AD) y de baja (BD) densidad en Santa Elena, Colombia.

Parcela	Biomasa aérea	Biomasa radical	Total C/árbol	Total C*/ha
1 AD	96.69	21.21	0.0423	48.69 <sup>a</sup> (12.9)
2 AD	56.48	12.47	0.0228	
3 AD	86.33	18.95	0.0398	
Prom.	79.83	17.54	0.0350	
1 BD	83.45	18.11	0.0733	50.04 <sup>a</sup> (2.6)
2 BD	85.88	18.62	0.0794	
3 BD	77.35	16.80	0.0686	
Prom.	82.23	17.84	0.0738	

\*Superíndices con letras distintas difieren estadísticamente ( $P < 0.05$ ). Entre paréntesis desviación estándar de C fijado/tratamiento de densidad.

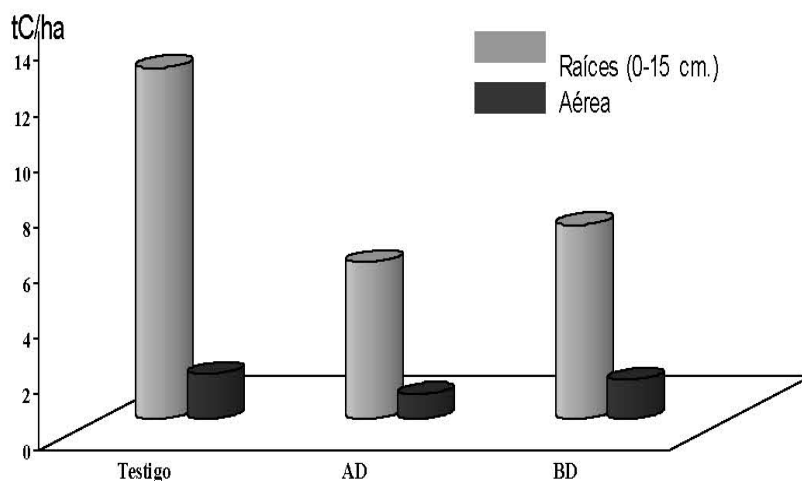


Figura 1. Existencias promedio de C en la biomasa aérea y en las raíces de *P. clandestinum* en siembras sin (testigo) y con árboles de *A. decurrens* y en alta (AD) y baja (BD) densidad en Santa Elena, Colombia.

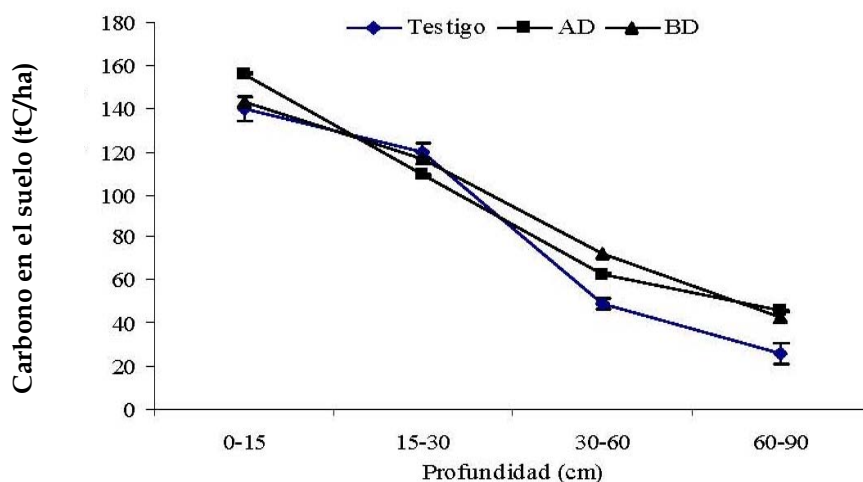


Figura 2. Cantidad de C presente en los diferentes estratos de profundidad del suelo con siembra de sólo pastura (testigo) y más un baja (BD) y alta (AD) densidad en Santa Elena, Colombia

luz, que afecta la fotosíntesis, por nutrientes y por el espacio de suelos a nivel radicular (Figura 1). El crecimiento y el ciclo de renovación de las raíces son dos componentes relevantes en el secuestro de carbono en las raíces de las pasturas, cuya medición permite comprender el papel de éstas en el proceso de fijación de carbono (Rao *et al.*, 2001).

Para AD se encontró 156,21 tC ha<sup>-1</sup> en los primeros 15 cm de suelo, cantidad diferente de las encontradas en BD y el testigo en el mismo estrato (Figura 2). A los seis años el SSP de AD aporta suficiente material orgánico al suelo

como para marcar estas diferencias. López (1999), reportó cómo la cantidad y la variabilidad de la distribución de C en el suelo disminuye y aumenta, respectivamente a medida que se profundiza en el perfil, situación acorde con el presente trabajo (Figura 2).

Las existencias de C (Cuadro 2) determinan diferencias con respecto al testigo para poder cuantificar la adicionalidad ambiental (diferencia de C entre la línea base: T y la situación con SSP), según el MDL (IPCC, 2006).

En el Cuadro 2, se evidencia como alrededor del 30% del C fijado tanto en AD como en

Cuadro 2. Existencias de carbono en cinco compartimientos y el flujo a través de las heces de vacas en pastoreo en Santa Elena, Colombia

Compartimiento	Silvopastoreo (A D)	Silvopastoreo (B D)	Testigo (Pasto sólo)
Parte aérea de los árboles (tC/ha)	79.839	82.232	-
Parte radical de árboles (tC/ha)	17.549	17.847	-
Parte aérea de pastos (tC/ha)	0.87	1.39	-1.60
Parte radical de pastos (tC/ha)	5.63	6.97	12.63
Carbono en suelo (0-15 cm) (tC/ha)	156.21	142.68	139.99
Total (tC/ha)	260.09 <sup>a</sup>	251.11 <sup>a</sup>	154.22 <sup>b</sup>
Flujo en heces (tC/vaca-año)	0.50 <sup>a</sup>	0.47 <sup>b</sup>	0.48 <sup>b</sup>

\*Superíndices con letras distintas difieren estadísticamente ( $P < 0.05$ ).

BD corresponde a la biomasa aérea de los árboles que representa un 40% más cuando se comparan con el testigo. El retorno de C a través de las heces de los animales se vió influenciado por la densidad de siembra de árboles, siendo mayor en AD, debido posiblemente al mayor consumo del forraje por los

animales en este tratamiento. Las excretas de los animales se consideran materia orgánica (Martín y Palma, 1999) cuya fijación de C en el suelo es de 65% producto de la descomposición, mientras el 35% restante se fuga como CO<sub>2</sub> por procesos de mineralización (Veldkamp, 1993).

### Conclusiones

La evaluación de los efectos de contrastantes densidades de siembra de árboles de *A. decurrens* en pasturas de *P. clandestinum*, usando una metodología apropiada para cuantificar la fijación de C, permitió obtener información considerada pionera en Colombia. Su mayor virtud está en la precisión y la intensidad usada para su determinación. La biomasa aérea y

radical de los árboles son las que marcan las diferencias en la existencia de C respecto al testigo. Para sistemas silvopastoriles, se logró verificar que la densidad de siembra de *A. decurrens* en pasturas de kikuyo tiende a afectar la fijación de C por las pasturas y su retorno anual a través de las excretas de los animales en pastoreo.

### Literatura Citada

- Brown, S. 1997. Los bosques y el cambio climático: El papel de los terrenos forestales como sumideros de carbono. Congreso Forestal Mundial. Turquía.
- Cochran, R., D. Adams, J. Wallace, and M. Galyean. 1988. Predicting digestibility of different diets with internal markers: Evaluation of four potential markers. *J. Anim. Sci.* 63: 476-1484.
- Euclides, V., M. Macedo e M. Oliveira. 1962. Avaliação de diferentes métodos de amostragem sob pastejo. *Soc. Bras. Zoot.* 21: 691-703.
- FEDEGAN, 2006. Plan Estratégico de la Ganadería Colombiana 2019. Federación de Ganaderos de Colombia-FNG. Bogotá.
- Giraldo, A. 2000. Sistemas silvopastoriles, alternativa sostenible para la ganadería en Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. PRONATTA- CONISILVO.
- Holmann, F., L. Rivas, J. Carulla, B. Rivera, L. A. Giraldo, S. Guzmán, M. Martínez, A. Medina, and A. Farrow. 2003. Evolution of milk production systems in tropical Latin America and its interrelationship with markets: An analysis of the Colombian case. *Livest. Res. Rural Develop.* 15(9). <http://www.cipav.org.co/lrrd/lrrd15/9/holm159.htm>

- IPCC 2006. IPCC Third Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/>
- Lascano C. 1990. Metodología para medir consumo bajo pastoreo. En: M. Ruiz y A. S. Ruiz. (Eds.). Nutrición de Rumiantes. Guía Metodológica de Investigación IICA-ALPA-RISPAL, Costa Rica.
- López, A., A. Schlonvöigt, M. Ibrahim, C. Kleinn y M. Kannien. 1999. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona atlántica de Costa Rica. *Agr. en las Amér.* 6 (23): 51-53.
- MacDicken, K. 1997. A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects. Winrock International Institute for Agricultural Development. Morrilton, AR.
- Martín, C. y J. Palma. 1999. Manual para fincas y ranchos ganaderos. Indicadores útiles para su manejo. *Tablas tropicales de composición de alimentos. Agrosys.* 25:35-47.
- Orrego, S., D I. del Valle y F. Moreno. (Eds). 2000. Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: Contribuciones para la mitigación del cambio climático. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín y Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente.
- Ørskov, E., F. Hovell, y F. Mould. 1980. Uso de la técnica de la bolsa de nailón para la evaluación de los alimentos. *Prod. Anim. Trop.* 5:213-233.
- Rao, I., G. Rippstein Escobar y J. Ricaurte. 2001. Producción de biomasa vegetal epigea e hipogeas en las sabanas nativas. En: G. Rippstein, G. Escobar y F. Motta (Eds.). *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia.* CIAT. Cali, Colombia.
- Van Soest, P. 1982. *Nutritional Ecology of the Ruminant.* O & B Books. Corvallis, OR.
- Veldkamp, E. 1993. Soil organic carbon dynamics in pastures established after deforestation in the humid tropics of Costa Rica. PhD Tesis, University of Wageningen.