
ALMACENAJE DE CARBONO EN ESTADIOS DE LA SUCESIÓN SECUNDARIA EN LA PROVINCIA DE MISIONES, ARGENTINA

SABRINA VACCARO, MARCELO F. ARTURI, JUAN F. GOYA,
JORGE L. FRANGI y GABRIEL PICCOLO

El incremento de la concentración de CO₂ en la atmósfera y su incidencia en el cambio climático, promovió el interés en la fijación biológica de carbono como un medio para reducir dicha concentración (Houghton, 1996; Krankina *et al.*, 1996). Los bosques tropicales secundarios podrían resultar apropiados a ese fin debido a que combinan altas tasas de fijación de carbono con una gran superficie disponible (Moura Costa, 1996; Ortiz *et al.*, 1998). La conversión agrícola del bosque ha permitido, desde los orígenes de la agricultura, la subsistencia de muchos pueblos, y aún hoy la población campesina del trópico depende del cultivo del suelo forestal para producir su alimento. Estos sistemas brindan asimismo múltiples bienes y servicios ambientales: contribuyen al mantenimiento de los suelos y recursos hídricos, son hábitat de fauna silvestre y fuente de recursos madereros y no madereros para las comunidades locales (Brown y Lugo, 1990, Chazdon y Coe, 1998, Whitmore, 1998).

La vegetación sucesional secundaria se establece espontáneamente después de la ocurrencia de perturbaciones o del abandono de comunidades de cultivo que reemplazan a la selva primaria. Ejemplos de ella es la vegetación presente en selvas aprovechadas donde se han extraído especies forestales de interés comercial, y la que aparece en las tierras con cultivos anuales después de su abandono temporal o permanente. El aumento de biomasa y el almacenaje de carbono orgánico total del ecosistema durante el proceso sucesional constituyen parte de modelos fundamentales de la ecología (Odum, 1969). La recuperación de las propiedades físicas y químicas de los suelos y la disminución de la erosión a medida que avanza la sucesión secundaria, ha sido informada por diversos autores (Ramakrishnan, 1992; Reiners *et al.*, 1994; Fearnside y Barbosa, 1998).

Los bosques secundarios podrían funcionar como sumideros de carbono en la vegetación, en los suelos y

en productos madereros duraderos, con impacto en los balances de gases de efecto invernadero y en consecuencia sobre el cambio climático global (Brown y Lugo, 1982; Lee *et al.*, 1996, Ortiz *et al.*, 1998; Hughes *et al.*, 1999; Rhoades *et al.*, 2000). En este sentido, Brown (1996) considera como puntos claves para evaluar la factibilidad de una estrategia de mitigación, conocer i) la disponibilidad de tierras aptas, ii) la cantidad de carbono que puede ser secuestrado y conservado en la vegetación y el suelo por unidad de área, y iii) el periodo de tiempo en el cual este carbono puede ser almacenado.

En la Provincia de Misiones los procesos de cambio de la vegetación como consecuencia del uso de la tierra originaron 350000ha de arbustales y bosques secundarios o capueras (Kozarik y Díaz Benetti, 1997). Muchas de esas tierras resultan de una mezcla del sistema de rotación propio del cultivo tradicional y de la práctica de agricultura convencional de cultivos de renta. A pe-

PALABRAS CLAVE / Acumulación de Carbono / Agricultura de Rozado / Bosques Subtropicales / Sucesión Secundaria / Sumideros de Carbono /

Recibido: 24/04/2003. Modificado: 26/08/2003. Aceptado: 28/08/2003

Sabrina Vaccaro. **Ingeniera Forestal, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Argentina. Docente, UNLP. Dirección: Laboratorio de Investigación en Sistemas Ecológicos y Ambientales (LISEA), Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Diagonal 113, N°469, 1900, La Plata, Argentina. e-mail: lisea@ceres.agro.unlp.edu.ar**

Marcelo F. Arturi. **Doctor en Ciencias Naturales, UNLP. Docente-Investigador, LISEA-UNLP, Argentina. e-mail: talaes@ceres.agro.unlp.edu.ar**

Juan F. Goya. **Ingeniero Forestal, UNLP. Docente-Investigador, UNLP, Argentina. e-mail: lisea@ceres.agro.unlp.edu.ar**

Jorge L. Frangi. **Doctor en Ciencias Naturales, UNLP, Argentina. Director, LISEA. Profesor Titular, UNLP, Argentina. e-mail: lisea@ceres.agro.unlp.edu.ar**

Gabriel Piccolo. **M.Sc. en Ciencias del Suelo, Universidad de Buenos Aires, Argentina. Doctor en Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina. Investigador, Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul, Instituto nacional de Tecnología Agropecuaria, Misiones, Argentina. e-mail: gpiccolo@cerro.inta.gov.ar**

sar de la importancia que tienen estos sistemas de barbecho como mejoradores de áreas degradadas, no existe en la actualidad información disponible sobre la dinámica del carbono en tierras de Misiones. Lugo (1992) y Aide *et al.* (1996), plantean la necesidad de profundizar el conocimiento de la recuperación forestal que ocurre después del abandono de tierras utilizadas para la agricultura. Una mejor comprensión de la dinámica sucesional y de la importancia de los servicios ambientales que brindan los bosques secundarios subtropicales resulta de importancia para definir pautas de manejo sustentable (Finegan, 1992, Ortiz *et al.*, 1998; Sips y van der Linden, 1998).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el almacenamiento de carbono en la biomasa, mantillo y suelo, en diferentes etapas de la sucesión secundaria a partir de cultivos anuales abandonados ubicados en tierras de selva misionera. La hipótesis a corroborar es que la fijación de carbono por la vegetación espontánea que ocupa las tierras de selva cultivadas y abandonadas, con posterioridad al manejo de cultivos anuales en el sur de Misiones, y los procesos que intervienen en su ciclado, resultan en un aumento de los depósitos edáficos y biomásicos de carbono a través del tiempo. A esa hipótesis subyacen preguntas tales como ¿Varía la tasa de acumulación en las distintas etapas sucesionales? ¿Cuál es el compartimiento que presenta la mayor acumulación neta de carbono y cual es la acumulación total de carbono orgánico? ¿Varía la proporción de carbono sumido en los distintos compartimientos a través del tiempo? La respuesta a esas preguntas se asocia, al menos parcialmente, con los puntos ii y iii de Brown (1996).

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el Departamento Leandro N. Alem (27°39'S, 55°26'O), Provincia de Misiones. El clima de la zona es subtropical húmedo. La temperatura media anual es de 20-21°C con una amplitud media anual de 11°C. Las precipitaciones son de 1800-2000mm/año en un régimen pluviométrico isohigro.

El relieve zonal es ondulado a fuertemente ondulado, conformado por lomas asociadas a sectores escarpados e inclinados, desgastados por erosión hídrica, proceso ampliamente generalizado en la región. Los suelos pertenecen a los órdenes: 1) Alfisoles, de buena calidad y espesor variable (frecuentemente de 100 a 200cm de *solum*); 2) Ultisoles,

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LA VEGETACIÓN SUCESIONAL ESTUDIADA

| Sitio | Edad (años) | Altura (m) | Fisonomía |
|---------------------|-------------|------------|---------------|
| Arroyo del Medio II | 5 | 2-4 | Arbustal |
| El Chatón | 6 | 2-4 | Arbustal |
| Arroyo del Medio I | 7 | 3-5 | Bosque bajo |
| Arroyo del Medio I | 10 | 4-6 | Bosque bajo |
| El Chatón | 12 | 6-8 | Bosque bajo |
| Cerro Azul | 13 | 6-8 | Bosque bajo |
| Cerro Azul | >34 | 15-20 | Bosque maduro |

en lomas desgastadas que no superan los 200cm hasta el basalto; 3) Molisoles, con poco desarrollo en profundidad y asociados a pedregosidad; y 4) Inceptisoles, en áreas inclinadas hacia cursos de agua (Ligier, 1990). Fitogeográficamente, la vegetación pertenece al distrito de las selvas mixtas de la Provincia Paranaense (Cabrera, 1976).

Sitios estudiados

Se estudió la vegetación y el suelo en un bosque maduro, considerado como control, y 6 sitios de vegetación secundaria (localmente llamadas capueras) ubicados en predios de productores de las localidades de El Chatón y Arroyo del Medio, y en la Estación Experimental Agropecuaria del INTA de Cerro Azul (Tabla I). Además se extrajeron muestras de suelo en 3 cultivos recién abandonados. En las capueras, las muestras se tomaron en sitios de entre 5 y 13 años de edad. Las capueras más jóvenes de 5 y 6 años de edad estuvieron dominadas por especies de arbustos pertenecientes a los géneros *Baccharis* y *Eupatorium*, conocidas como chilcas. En las situaciones más avanzadas, correspondientes a fisonomías de bosque, dominaron especies arbóreas secundarias como *Helietta apiculata* Benth., *Lonchocarpus leucanthus* Burk., *Fagara* sp., *Apuleia leiocarpa* (Vog.) Macbr., *Machaerium* sp., y *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan. En el bosque maduro las especies dominantes fueron *Patagonula americana* Linné, *Holocalyx balansae* Mich., *Diatenopterix sorbifolia* Raldk., *Allophylus edulis* (St.-Hil.) Raldk y *Chrysophyllum gonocarpum* (Mart. & Eichler) Engl. Según información dada por los productores, en todas las capueras estudiadas se habían realizado cultivos anuales antes del abandono de la tierra. Generalmente, luego del desmonte se realizan cultivos anuales en una secuencia de especies determinada por sus exigencias de fertilidad: 2-3 años de tabaco, luego 2-3 años de maíz y, por último, 2-3 años de cultivos como poroto, mandioca o batata. Los pequeños produc-

tores cultivan sobre el mismo terreno durante varios años, recurriendo a una agricultura itinerante dentro de la misma chacra, habilitando nuevas tierras por medio del desmonte (por lo general renovales del bosque o capueras) y abandonando las tierras de labranza más antiguas por 3 a 10 años (Oliveri, 1997). Esta forma de cultivo, localmente conocida como rozado, es tradicional en los trópicos y conocida internacionalmente bajo las denominaciones de *shifting cultivation*, o *slash and burn agriculture* (Ramakrishnan, 1992).

Biomasa vegetal

En cada uno de los sitios de vegetación secundaria se estimó la biomasa por cosecha directa en tres parcelas de 5x5m. La vegetación fue separada en los compartimientos leñoso y copa (hojas más ramas <1cm), y pesada en fresco. Se utilizaron alícuotas de cada compartimiento que fueron pesadas en fresco, secadas en estufa a 70°C hasta peso seco constante, y se determinó un factor de humedad. Este factor se multiplicó por el peso fresco de campo de cada compartimiento, obteniéndose el peso seco y la biomasa (Mg·ha⁻¹).

En el bosque maduro se realizó un muestreo de la estructura en 3 parcelas de 20x20m, midiéndose para cada individuo arbóreo su altura y diámetro a la altura del pecho (DAP). Para la determinación del peso seco de los árboles se utilizó la siguiente ecuación de regresión específica para bosques subtropicales (Brown y Lugo, 1992)

$$\text{Peso Seco (kg)} = \exp(-3,1141 + 0,9719 \ln(\text{DAP}^2 \cdot \text{H}))$$

donde DAP: diámetro a la altura del pecho (cm) y H: altura total (m)

La biomasa de cada parcela de bosque maduro surgió de la suma de los pesos de los individuos arbóreos de >5cm de DAP. No se calculó el peso de los estratos más bajos del bosque, debido a que este compartimiento represen-

ta menos del 3% de la biomasa de un bosque maduro (Lugo, 1992; Hughes *et al.*, 1999; 2000).

Mantillo

Se colectaron 5 muestras del mantillo fino (capa L) del suelo, empleando cuadros de 0,5x1m, en cada uno de los 7 sitios, en diciembre 1999 y agosto 2000. Esos muestreos correspondieron al momento previo y posterior al período de mayor caída de hojarasca (Placci *et al.*, 1994). El material se secó en estufa a 70°C a peso constante, y se obtuvo el peso seco de mantillo por unidad de superficie de cada sitio. Se consideró al promedio de ambas fechas como representativo de la cantidad de carbono en el mantillo en cada situación.

Para la conversión de materia seca en carbono orgánico se utilizó un factor de 0,45 (IPCC, 2000). Utilizando este factor de conversión en la biomasa y mantillo se estimó el contenido de carbono total en cada uno de estos compartimentos (Moura Costa, 1996).

Horizontes minerales del suelo

Debido al carácter somero de los suelos, las muestras se tomaron a dos profundidades del suelo mineral: 0-0,05 y 0,05-0,15m. En cada uno de los sitios se obtuvieron al azar 3 unidades muestrales para cada profundidad para análisis de carbono y 3 unidades para densidad aparente. Las muestras fueron secadas al aire. La concentración de carbono fue calculada por combustión seca con un analizador automático LECO CR-12 Carbon System 781-600. La densidad aparente se determinó a partir de muestras cilíndricas de volumen conocido tomadas con barreno.

El contenido de carbono orgánico del suelo para cada situación se obtuvo al multiplicar la concentración de carbono por una masa patrón de suelo que equivale al peso de suelo de bosque primario correspondiente a 1ha y 0,15m de profundidad; esta masa fue calculada empleando la densidad aparente y el espesor de las dos capas de suelo muestreadas. Fearnside y Barbosa (1998) y Rhoades *et al.* (2000) recomiendan corregir los contenidos de carbono por la compactación vertical en los suelos que han sufrido cambios de densidad como consecuencia de su uso.

Modelos de carbono

Se utilizaron modelos logísticos de crecimiento para analizar los cambios de carbono en la biomasa total y

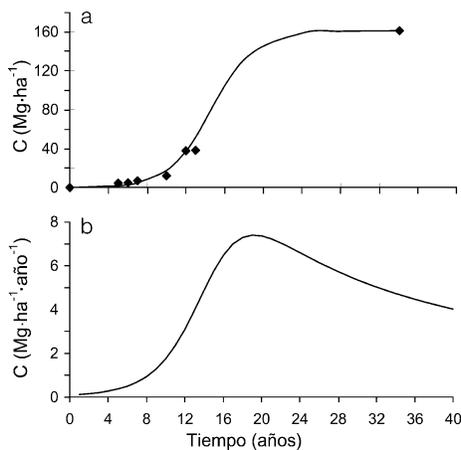


Figura 1. Estimación de la biomasa total (a) e incremento medio anual de la biomasa (b) durante la sucesión secundaria.

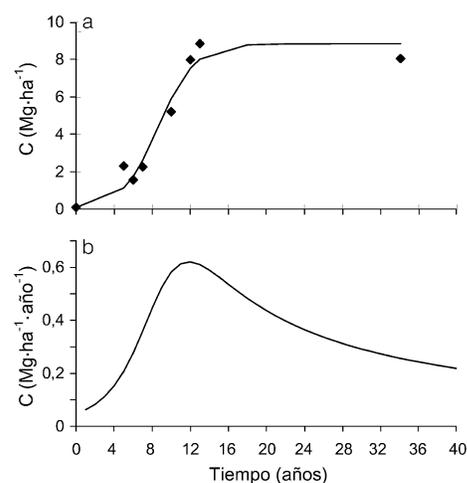


Figura 2. Estimación de la biomasa de copa (a) e incremento medio anual de la biomasa de copa (b) durante la sucesión secundaria.

TABLA II
RESULTADOS DE LOS AJUSTES DE LOS MODELOS DE VARIACIÓN EN EL TIEMPO DEL CARBONO EN CADA COMPARTIMIENTO

| | r ² | F | P | T (90)* | T max |
|---------------|----------------|------|------|---------|-------|
| Suelo | 0,33 | 4,23 | 0,09 | 12 | 1 |
| Mantillo | 0,91 | 74,1 | 0 | 23 | 1 |
| Copa | 0,95 | 137 | 0 | 13 | 12 |
| Biomasa total | 0,99 | 590 | 0 | 20 | 19 |
| Gl 1, 6 | | | | | |

r²: coeficiente de determinación, F: estadístico de Fisher, p: nivel de significancia, T (90): tiempo necesario para el 90% del valor máximo de acumulación del compartimiento, T max: edad a la que ocurre la máxima tasa media de acumulación de carbono en cada compartimiento.

biomasa de copa en función del tiempo. Los valores de carbono en la biomasa total de cada uno de los estadios sucesionales fueron transformados según

$$\log(p/(1-p))$$

donde p: Bs/Bm, Bs: carbono en la biomasa del estadio sucesional correspondiente, y Bm: carbono en la biomasa del bosque maduro.

Esta transformación linealiza el modelo logístico de modo que si los datos sin transformación se ajustan a ese modelo, entonces ellos ajustarán a una recta cuando se aplica esta transformación. Se calculó la regresión de la edad sobre la masa de carbono con la finalidad de calcular la edad necesaria para alcanzar el valor del bosque maduro. Luego de haber obtenido esa edad se ajustó el modelo logístico para el carbono en la biomasa de copa. Para el carbono en el suelo mineral y el mantillo se ajustaron modelos logarítmicos debido a que la tasa de aumento presentó una tendencia siempre decreciente. A partir de los modelos ajustados se calculó el in-

cremento medio anual para cada compartimiento como el cociente entre la masa de carbono y la edad en cada una de las edades consideradas.

Resultados

Los valores de biomasa de las capueras hasta 12 años se ajustaron a la tendencia esperada para un modelo logístico (Tabla II). La edad mínima necesaria para alcanzar la biomasa aérea total del bosque maduro, calculada en función de ese modelo, fue de 34 años (Figura 1) siendo 25 y 43 años los límites de confianza al 95%.

La biomasa de copa presentó un ajuste significativo con el modelo logístico (Tabla II). Ella tendió a estabilizarse antes que la biomasa total, ya que el tiempo para alcanzar el 90% de su valor máximo fue de 13 años en comparación con los 20 años requeridos por la biomasa total (Figura 2). La biomasa de la copa fue siempre inferior a la de las partes leñosas y representó una mayor proporción de la biomasa total en las capueras jóvenes que en las más viejas y

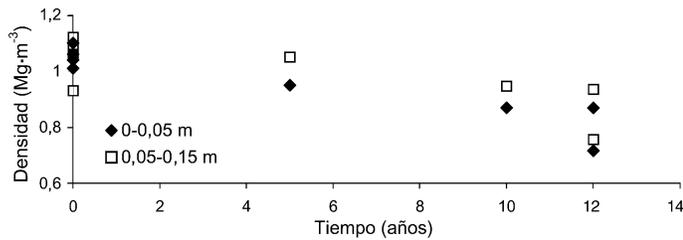


Figura 3. Densidad de suelo en el tiempo, para dos profundidades estudiadas.

su proporción varió entre 45% hasta un 20% a los 12 y 13 años.

El carbono en la biomasa total alcanzó una tasa media anual de incremento de $7,4\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ a los 19 años. En las capueras entre 5 y 6 años esa

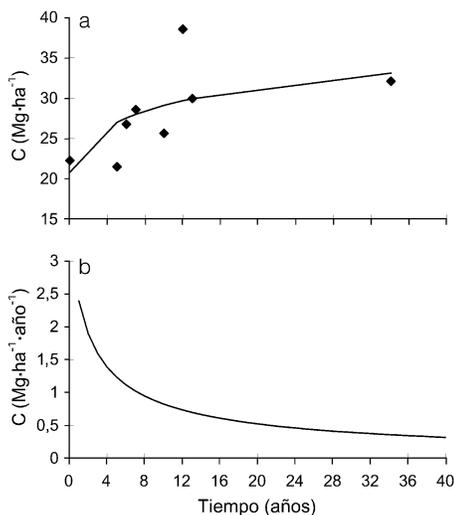


Figura 4. Estimación del carbono en el suelo (a) e incremento medio anual del carbono en el suelo (b) durante la sucesión secundaria.

tasa fue de alrededor de $1\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. A los diez años el aumento varió entre 1 y $2\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$; a los 15 años de edad se acercó a $6\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ (Figura 1). En la copa, la máxima tasa media anual de acumulación de carbono fue de $0,62\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y ocurrió a los 12 años (Figura 2).

Se halló una regresión significativa de la densidad aparente del suelo sobre la edad y la profundidad ($r^2=0,23$; $F_{(2,19)}=8,75$; $p<0,01$) siendo significativa la primer variable ($t=-4,0$; $p<0,01$) pero no la segunda. Este resultado indicó que la densidad aparente fue menor para los sitios con mayor tiempo de abandono (Figura 3). Para el carbono del suelo mineral y del mantillo las tendencias de cambio en función del tiempo presentaron una pendiente continuamente decreciente (Figuras 4 y 5). La variación del mantillo se ajustó significativamente a un modelo logarítmico (Tabla II). En el caso del

suelo ese modelo explicó algo más del 30% de la varianza pero el ajuste no resultó significativo (Tabla II). Debido a que el valor de F resultó cercano al límite de significancia se consideró al modelo de la tendencia de la densidad de suelo y se lo utilizó en el cálculo de la tasa de media anual de acumulación. El tiempo necesario para alcanzar el 90% del valor máximo de carbono fue de 12 y 24 años para el suelo y el mantillo respectivamente y el momento de máxima tasa media anual de fijación se observó en el primer año post-abandono para ambos compartimentos (Tabla II).

El carbono del suelo mineral representó la totalidad del carbono ecosistémico de las situaciones iniciales, pero su contribución proporcional descendió a aproximadamente el 50% alrededor de los 12 años (Figura 6). El carbono del mantillo nunca representó más de 8,5% mientras que el de la biomasa constituyó más del 80% en las etapas más antiguas.

Discusión y Conclusiones

El análisis mediante la cronosecuencia permite inferir la magnitud de la disminución del carbono del suelo y la vegetación en el proceso de desmonte y cultivo, y cómo ese contenido se incrementa a lo largo de la sucesión secundaria estudiada. Los resultados de este trabajo están basados en el análisis de sitios recientemente abandonados con vegetación secundaria de hasta 13 años de antigüedad y sitios de bosque maduro. La biomasa es el compartimiento que presenta la mayor tasa de acumulación de carbono a través de la sucesión, mientras que los incrementos en el mantillo y el suelo superficial (*topsoil*) son considerablemente menores en concordancia con lo hallado para bosques tropicales en México (Hughes *et al.*, 1999). Sin embargo, los cambios sufridos por este compartimiento durante los ciclos de cultivo son mucho menores que los de la biomasa por lo que puede considerarse un almacenamiento más durable.

La tasa de acumulación de carbono difiere entre compartimentos y resultó variable durante el tiempo sucesional. La canti-

dad de carbono en la biomasa estuvo dentro del rango de valores encontrados para bosques secundarios tropicales (Tabla III). El incremento de la biomasa se ajusta a un modelo logístico con su máxima pendiente entre los 12 y 19 años y su máxima tasa media a los 19 años. Estos resultados coinciden con los citados por Brown y Lugo (1990), que analizaron la tendencia presentada por datos de biomasa de bosques tropicales secundarios de distinta edad y encontraron que independientemente de las condiciones de sitio ocurre una rápida acumulación de biomasa hasta los 15-20 años, momento a partir del cual la tasa de acumulación comienza a decrecer hasta la madurez. Asimismo el tiempo necesario para alcanzar una bio-

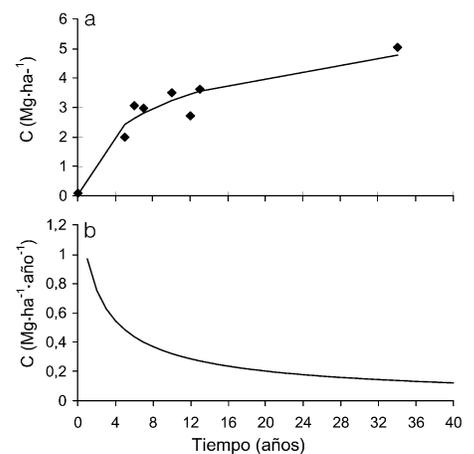


Figura 5. Estimación del mantillo (a) e incremento medio anual del mantillo (b) durante la sucesión secundaria.

masa similar a la del bosque maduro resulta semejante a los observados en el NE de la India por Ramakrishnan (1992). El tiempo de uso de la tierra previo al abandono podría afectar la velocidad a la cual se acumula la biomasa, ya que puede representar un distinto legado ecológico. Hughes *et al.* (1999) encontraron que la tasa media de incremento de biomasa está fuerte e inversamente relacionada con el tiempo de uso agrícola si se comparan sitios con menos de 7 años de uso con otros de más de 13 años. El tiempo de uso previo al abandono en los sitios del S de Misiones varió entre 3 y 6 años, por lo que todos estarían en condiciones

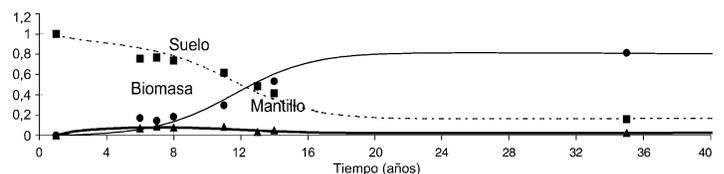


Figura 6. Variación de la proporción de los compartimentos con respecto al carbono total.

semejantes respecto de esa variable. Esto podría relacionarse con la inexistencia de alejamientos notables respecto de la biomasa esperada por el modelo logístico, ya que las diferencias entre sitios en la tasa de recuperación podría haberse reflejado como residuos de los puntos respecto del modelo. Ese modelo de incremento se observa tanto para la biomasa total como para la biomasa de copa, pero esta última se estabiliza más rápidamente que la biomasa aérea total. Eso es esperado en tanto las plantas privilegian inicialmente el despliegue de la mayor superficie fotosintética para la fijación de energía solar por sobre la construcción de los tejidos aéreos de sostén y transporte. La biomasa de la copa se desarrolla rápidamente en las pri-

meras etapas de la sucesión en todas las zonas de vida y aumenta muy poco en las etapas siguientes (Brown y Lugo, 1982). El carbono de la copa representa una importante proporción del total en las etapas menores de 10 años pero su contribución es considerablemente menor en las etapas maduras; constituye un compartimiento sumamente dinámico ya que sus componentes tienen las tasas de recambio más elevadas de la biomasa aérea, y mediante la caída de hojas, frutos y ramas finas, parte de ella pasa a formar parte del mantillo y, tras su fraccionamiento y descomposición, se incorpora al suelo. Las variaciones en la biomasa de la copa podrían promover un aumento en las tasas de caída de hojarasca y finalmente relacionarse con el incremento del carbono del suelo; no obstante, otra fracción es aportada por la mortalidad no estudiada de la biomasa subterránea. La copa y el suelo alcanzan el 90% de su contenido máximo de carbono entre los 12 y 13 años. Si bien el mantillo tarda unos 23 años en alcanzar el 90% de su valor máximo a los 12-13 años presenta aproximadamente el 75%. Algunos trabajos indicaron la existencia de patrones temporales similares en biomasa de la copa y la biomasa de raíces a lo largo de la sucesión (Brown y Lugo, 1990). Estos compartimentos constituyen la fuente principal del carbono del suelo.

Los cambios temporales en el almacenaje de carbono del suelo no fueron tan marcados como los cambios en la vegetación. Se observó un proceso de pérdida y recuperación entre las etapas de bosque nativo, cultivo y sucesión secundaria. Piccolo *et al.* (2002) encontraron una variación muy definida de la concentración, indicando que la cantidad de carbono por unidad de sólido de suelo en los primeros 5cm cambia en el sentido antes descrito, como consecuencia de procesos de pérdida y ganancia netas. Sin embargo, cuando esos cambios son analizados a través del contenido de carbono, para un mismo volumen de suelo en todas las situaciones, las tendencias de pérdida y ganancia resultan atenuadas. Una alternativa a dicho cálculo podría plantearse si en lugar de mantener fijo el vo-

lumen de suelo se compara la misma masa de suelo en todas las situaciones (Fearnside y Barbosa, 1998; Rhoades *et al.*, 2000). La justificación de dicha forma de cálculo reside en los cambios observados de la densidad aparente concomitantes con los cambios de concentración de carbono. Los resultados obtenidos podrían interpretarse como un aumento de la densidad aparente entre el bosque nativo y el cultivo, y luego una disminución con el avance de la sucesión secundaria (Figura 3; Reiners *et al.*, 1994; Rhoades *et al.*, 2000). Este hecho probablemente se debe a variaciones en la densidad de raíces, compartimiento que puede representar hasta un 10% de la biomasa arbórea viva en un bosque secundario de 11 años (Cuevas *et al.*, 1991). En consecuencia la masa de suelo mineral considerada en la situación inicial, no sería la misma que en las restantes situaciones si se comparan volúmenes fijos. Probablemente parte de la controversia en las conclusiones sobre la dinámica del carbono del suelo en la secuencia cultivos-sucesión secundaria se deba a la necesidad de incorporar estas correcciones en los cálculos de contenido de carbono del suelo. Los suelos de bosques secundarios de Misiones acumularon una cantidad de carbono semejante a la del bosque primario a los 12 años, tiempo de recuperación que es bastante menor a lo indicado por otros autores, entre 40 y 50 años (Brown

y Lugo, 1990), 20 años (Rhoades *et al.*, 2000) y 15 años para bosques secundarios originados a partir de pasturas (Fearnside y Barbosa, 1998). No obstante, Hughes *et al.* (1999, 2000) no encontraron relaciones significativas entre el contenido de carbono de los suelos de cultivos y bosques secundarios con la edad ni con el tiempo de uso previo.

En las situaciones más antiguas el carbono de la biomasa constituye la mayor parte del carbono del ecosistema. La contribución del suelo es importante sólo en las situaciones menores de 10 años; ésto se debe principalmente a que debido al carácter somero de los suelos sólo se consideró una profundidad de 15cm. La importancia de cada compartimiento puede variar en función de la profundidad de suelo considerada, sea ésta producto del espesor real del suelo o del muestreo efectuado. Hughes *et al.* (1999) utilizando el contenido de carbono en 1m de suelo reportaron que el suelo representa siempre más del 58% del carbono acumulado en el sistema; sin embargo, si se consideran sólo los 10cm superficiales sus resultados son compatibles con nuestras conclusiones. Rhoades *et al.* (2000) concluyeron que en los 15cm superficiales se produce el 50% de las pérdidas de carbono contenidos en 1m de suelo. En los sitios estudiados, el desmonte de un bosque maduro implica una pérdida de carbono de 162Mg·ha⁻¹ mientras que desde el suelo esa salida es de alrededor de 10Mg·ha⁻¹. Si el desmonte se efectúa sobre una capuera con edades entre 5 y 10 años, las pérdidas serían de 10Mg·ha⁻¹ y 3,5Mg·ha⁻¹ desde la biomasa y el suelo respectivamente.

Dada la importancia conferida actualmente a la fijación de carbono, debido a su incidencia sobre el cambio climático, podría plantearse una estrategia de uso de la tierra que contemple a las áreas de capueras para tal fin y que sea coherente con el objetivo primario de sustentabilidad para el campesinado. El carbono acumulado en las capueras no es permanente ya que a una edad de entre 6 y 10 años las mismas son nuevamente utilizadas como áreas de cultivo. Sólo algunas parcelas se mantienen en estado de capuera hasta los 12-14 años siendo éste el tiempo necesario para alcanzar condiciones semejantes a la del bosque maduro en cuanto al contenido de carbono del suelo y probablemente similares condiciones de fertilidad. En ese proceso, el carbono acumulado se libera con la tumba, quema, descomposición y otras pérdidas de material orgánico durante las tareas de preparación del terreno y los años de cultivo. En un contexto regional, el área sometida a cultivos itinerantes presenta una

TABLA III
VALORES DE CARBONO EN LA BIOMASA DE BOSQUES TROPICALES

| Edad (años) | Carbono (Mg·ha ⁻¹) | Referencias |
|---------------|--------------------------------|--|
| 3-8 | 9,8- 18,5 | Saldarriaga y Uhl, 1991; Lugo, 1992; Hughes <i>et al.</i> , 1999 |
| 8-10 | 26 - 43,6 | Saldarriaga y Uhl 1991, Hughes <i>et al.</i> , 1999 |
| 15-30 | 32,4- 49 | Lugo, 1992 |
| Bosque maduro | 115 -118 | Saldarriaga y Uhl, 1991; Hughes <i>et al.</i> , 2000 |

cubierta de vegetación secundaria que resulta de un balance dinámico entre las tierras abandonadas y las utilizadas para nuevos cultivos. Si las tasas de abandono e incorporación al cultivo son semejantes, existe un almacenaje estable de carbono en la vegetación secundaria y el suelo a escala de paisaje, aunque ese almacenaje no sea estable en las capueras consideradas individualmente. Si se prolonga el tiempo de duración de las capueras aumenta la biomasa de las más antiguas y el carbono acumulado en el conjunto de la superficie. Además, como el área manejada por cada productor es fija, el aumento en la edad que alcanzan las capueras implica aumentar el tiempo bajo cultivo de la fracción agrícola lo cual inexorablemente exige cambios en el manejo de los cultivos. Diferentes experiencias en la zona indican que la utilización de cubiertas verdes o abonos verdes retardan la disminución de la productividad de los suelos (Morrás y Piccolo, 1996). El INTA y la empresa Tabacos Norte S.A., en un estudio conjunto (Nestor Oliveri, comunicación personal), lograron obtener rendimientos estables de tabaco y suelos con tendencia a mejorar cuando se los mantuvo cubiertos y se incorporó materia orgánica con cubiertas verdes de invierno (*Avena strigosa*) y de verano (*Vigna sinensis*). Estos ensayos dan lugar a pensar que es posible sostener un área bajo cultivo durante mayor tiempo sin perjuicio económico al productor y favorecer por otra parte la acumulación de carbono en las capueras. En consecuencia, la cantidad de carbono acumulado en el área total podría aumentar debido a la mayor biomasa media de las capueras. Tales cambios en el sistema productivo serían factibles si representaran alguna ventaja económica o, al menos, no implicaran una disminución en la rentabilidad respecto del sistema actual. La valoración de un sistema con mayor tiempo de permanencia de las capueras debería contemplar sus potencialidades para la producción de beneficios económicos y la provisión de servicios ambientales. Los primeros podrían relacionarse con la utilización de especies maderables establecidas espontáneamente; o mediante sistemas de enriquecimiento de etapas sucesionales tempranas e intermedias con especies comerciales o que aporten productos para mejorar la subsistencia (Montagnini *et al.*, 1997). El conocimiento de métodos silviculturales para el establecimiento y manejo de especies nativas comercializables es especialmente relevante ya que mejoran las condiciones del suelo a la vez que son una fuente de ingresos para los pobladores (Fernández y Montagnini, 1997). Muchas de estas especies poseen

hojas palatables para el ganado, el cual puede constituir una renta a corto plazo. La obtención de productos madereros representa una ventaja extra desde el punto de vista de la fijación de carbono, ya que constituye una porción que no se libera inmediatamente a la atmósfera cuando la capuera se convierte nuevamente en área de cultivo, ya que dichos productos tienen una vida media mayor por su uso en muebles y bienes duraderos. En la actualidad no existe una demanda de madera de especies tempranas de poca dimensión, lo que hace imprescindible el desarrollo de tecnologías que permitan transformar el potencial biológico de estos bosques en potencial económico (Finegan, 1992). Por otra parte, un mosaico de vegetación con una contribución adecuada de parches de vegetación secundaria y la existencia de capueras de mayor desarrollo constituyen una contribución a la conservación de la biodiversidad, dada la importancia de dichos ambientes como hábitat de especies animales y vegetales (Sips y van der Linden, 1998; Chazdon y Coe, 1998; Fimbel, 1994; Medellín y Equihua, 1998).

Así como las consideraciones anteriores permiten visualizar la posibilidad de mejorar la situación social y ambiental del pequeño productor misionero, debe tenerse en cuenta que la presión demográfica en aumento resulta en la escasez de tierras de cultivo. Este fenómeno está ocasionando por un lado la expansión de la frontera agrícola de subsistencia en terrenos de selva relativamente vírgenes (Perucca, 1991; Albaladejo, 1992) y, por otro, el fraccionamiento de los predios dentro del área colonizada del centro sur de Misiones (Alejandro Piekun, comunicación personal). Las consecuencias de ese proceso van, inexorablemente, en la dirección inversa a la propuesta. Así, esa dinámica social en el centro sur de Misiones ocasiona la intensificación del uso de la tierra, con ciclos de rotaciones cortas y disminución de la edad promedio de las capueras, sus almacenajes de carbono y menor estabilidad de los suelos. Chapin *et al.* (1996) fundado en los resultados de Ramakrishnan (1992) en India, sugiere que largos períodos (20-40 años) de barbecho natural permiten la sustentabilidad agrícola. Obviamente, ese período es dependiente de las condiciones ecológicas de cada región. El uso acelerado hace insostenible a dicha agricultura ya que con ciclos breves (<10 años en el NE de India) se observan claros síntomas de declinación en la producción de las etapas sucesionales como resultado de suelos empobrecidos, frecuente desertificación y abandono de la tierra (Ramakrishnan, 1992). Evitar alcanzar los

umbrales de degradación es un desafío para técnicos y productores.

REFERENCIAS

- Aide TM, Zimmerman J, Rosario M, Marcano H (1996) Forest recovery in abandoned cattle pasture along an elevational gradient in northeastern Puerto Rico. *Biotropica* 28: 537-548.
- Albaladejo Ch (1992) Análisis de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas con el concepto de equilibración. *Rev. Inst. Invest., Fac. Human. Cs. Soc., Univ. Nac. Misiones. Estudios regionales* 3: 7-18.
- Brown S (1996) Mitigation potential of carbon dioxide emissions by management of forest in Asia. *Ambio* 25: 273-278.
- Brown S, Lugo AE (1982) The storage and production of organic matter in Tropical forest and their role in the global carbon cycle. *Biotropica* 14: 161-187.
- Brown S, Lugo AE (1990) Tropical secondary forests. *J. Trop. Ecol.* 6: 1-32.
- Brown S, Lugo AE (1992) Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Sci.* 35: 881-902.
- Cabrera AL (1976) Regiones Fitogeográficas Argentinas. En *Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería*. Tomo II. ACME. Buenos Aires. Argentina. 85 pp.
- Chapin FS, Torn MS, Taten M (1996) Principles of Ecosystem sustainability. *American Naturalist* 148: 1016-1037.
- Chazdon RL, Coe FG (1998) Abundance and diversity of useful woody species in second growth, old growth and selectively-logged forests of NE Costa Rica. En Guariguata MR, Finegan B (Eds.) *Ecology and management of tropical secondary forest: science, people and policy*. CATIE. Costa Rica. pp. 165-183
- Cuevas E, Brown S, Lugo AE (1991) Above- and belowground organic matter storage and production in tropical pine plantation and a paired broadleaf secondary forest. *Plant Soil* 135: 257-268.
- Fearnside PM, Barbosa RI (1998) Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecol. Manag.* 108: 147-166.
- Fimbel C (1994) The relative use of abandoned farm clearings and old forest habitats by primates and forest antelope at Twiai, Sierra Leone, West Africa. *Biol. Conserv.* 70: 277-286.
- Finegan B (1992) *El potencial de manejo de los bosques húmedos secundarios neotropicales de las Tierras Bajas. Programa de producción y desarrollo agropecuario sostenido*. Serie Técnica. N°188. CATIE. Costa Rica. 28 pp.
- Houghton RA (1996) Converting terrestrial ecosystems from sources to sinks of carbon. *Ambio* 25: 267-272.
- Hughes RF, Kauffman JB, Jaramillo VJ (1999) Biomass, carbon, and nutrient dynamic of secondary forests in a humid tropical region of Mexico. *Ecology* 80: 1892-1907.
- Hughes RF, Kauffman JB, Jaramillo VJ (2000) Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a Humid Tropical Region of Mexico. *Ecol. Applic.* 10: 515-527.

- IPCC (2000) *Land use, land use change and forestry*. WMO-UNEP. Cambridge University Press. RU. 251 pp.
- Kozarik JC, Díaz Benetti W (1997) Los bosques naturales de Misiones. Principales factores que determinaron su deterioro ambiental. *II Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, Posadas*. pp. 152-157
- Krankina ON, Harmon ME, Winjum K (1996) Carbon storage and sequestration in Russian Forest Sector. *Ambio* 25: 284-288.
- Lee H, Zhou D, Jung Y, Wisniewski J, Sathaye J (1996) Greenhouse gas emissions inventory and mitigation strategies for asian and pacific countries: Summary of workshop presentations and working group discussions. *Ambio* 25: 220-228.
- Ligier HD, Mateio HR, Polo HL, Rosso JR (1990) Provincia de Misiones. En: *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Tomo II. Centro de Investigaciones de Recursos Naturales. INTA. Castelar. Buenos Aires, Argentina. pp. 107-154.
- Lugo AE (1992) Comparison of tropical tree plantations with secondary forests of similar age. *Ecol. Monogr.* 62: 1-41.
- Medellin RA, Equihua M (1998) Mammal species richness and habitat use in rainforest and abandoned agricultural fields in Chiapas, Mexico. *J. Appl. Ecol.* 35: 13-23.
- Montagnini F, Eibl B, Grance L, Maiocco D, Nozzi D (1997) Enrichment planting in over exploited forest of Paranaense region of Misiones, Argentina. *Forest Ecol. Manag.* 99: 237-246.
- Morrás H, Píccolo GA (1996) *Degradación física y recuperación de un Ultisol bajo cultivo de yerba mate en la provincia de Misiones*. Informe de avance N°2. Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul. INTA. Argentina. 11pp.
- Moura Costa P (1996) Tropical forestry practices for carbon sequestration: A review and case study from Southeast Asia. *Ambio* 25: 279-283.
- Odum EP (1969) The strategy of ecosystem development. *Science* 164: 262-270.
- Oliveri NJ (1997) *Los sistemas agroforestales como alternativa de producción en Misiones*. Miscelanea N° 37. Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul. INTA. Argentina. 22 pp.
- Ortiz R, Ramírez O, Finegan B (1998) Co₂ mitigation service of Costa Rican secondary forests as economic alternative for joint implementation initiatives. En Guariguata MR, Finegan B (Eds.) *Ecology and management of tropical secondary forest: science, people and policy*. CATIE. Costa Rica. pp. 213-227.
- Perucca C (1991) *Reconocimiento de indicadores paisajísticos para un diagnóstico de sistemas agrícolas de producción. El caso de las pequeñas explotaciones agrícolas de la provincia de Misiones, Argentina*. Tesis. Inst Agronomique Mediterranéen. INRA. France. 213 pp. (Comentario de Schiavoni G, Rev. Inst. Invest., Fac. Human. Cs. Soc., Univ. Nac. Misiones. Estudios regionales 3: 47-52.)
- Píccolo GA, Frangi JL, Goya JF, Arturi MF, Vaccaro S (2002) *Materia orgánica y nutrientes en suelos de ecosistemas subtropicales de cultivo anual, foresto-ganadero y bosque secundario*. Informe técnico N°76. Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul. INTA. Argentina. 12 pp.
- Placci LG, Arditi SI, Ciotek LE (1994) Productividad de hojas, flores y frutos en el Parque Nacional Iguazú. *Yvyrareta* 5: 49-56.
- Ramakrishnan PS (1992) *Shifting agriculture and sustainable development: an interdisciplinary study from northeastern India*. Partenón. Park Ridge, NJ, EEUU. 424 pp.
- Reiners WA, Bowman AF, Parsons WFJ, Keller M (1994) Tropical rain forest conversion to pasture: change in vegetation and soil properties. *Ecol. Applic.* 4: 363-377.
- Rhoades ChC, Eckert GE, Coleman DC (2000) Soil carbon differences among forest, agriculture and secondary vegetation in Lower Montane Ecuador. *Ecol. Applic.* 10: 497-505.
- Saldarriaga JG, Uhl C (1991) Recovery of forest vegetation following slash-and-burn agriculture in the upper Rio Negro. En Gómez-Pompa A, Whitmore TC, Hadley M (Eds) *Rain forest regeneration and management*. Man and Biosphere Series. UNESCO. París, Francia. Vol 6. pp. 303-313.
- Siegel S (1988) *Non parametric statistics for behavioral sciences*. 2nd ed. McGraw-Hill. New York, EEUU. 478 pp.
- Sips PA, van der Linden VA (1998) Tropical secondary forest management: potential, constraints and recommendations. En Guariguata MR, Finegan B (Eds.) *Ecology and management of tropical secondary forest: science, people and policy*. CATIE. Costa Rica. pp. 1-10.
- Whitmore TC (1998) A Pantropical perspective on the ecology that underpins management of tropical secondary rain forests. En Guariguata MR, Finegan B (Eds.) *Ecology and management of tropical secondary forest: science, people and policy*. CATIE. Costa Rica. pp. 19-34.